



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

ELEKTRICKÉ SERVOPOHONY PRO KRITICKÉ APLIKACE

ELECTRICAL SERVODRIVES FOR CRITICAL APPLICATIONS

TITLE

DISERTAČNÍ PRÁCE

DISSERTATION THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ING. VLADIMÍR HUBÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

DOC. ING. VLADISLAV SINGULE, CSC.

BRNO 2011

Abstrakt

Disertační práce na téma „*Elektrické servopohony pro kritické aplikace*“ ucelenou formou analyzuje požadavky a nové trendy v oblasti elektrických servopohonů v oblasti kritických aplikací v letectví. Práce se především věnuje elektronicky komutovanému motoru středních výkonů, a to od funkčního popisu stroje přes dosud známé řídicí algoritmy a jejich porovnání až po návrh vlastního řešení elektrického pohonu. Jsou nastíněny vývojové práce v oblasti leteckého průmyslu od technického zadání, funkčního vzorku, prototypu až po navázání na sériovou výrobu a následnou certifikaci. Jsou rovněž aplikovány moderní metody vývoje založené na matematicko-fyzikálním modelování řešeného systému, které stále hledá své hlubší uplatnění v tomto odvětví. Na příkladu jsou také ukázány optimalizační postupy řídicích algoritmů. Tato práce si rovněž klade za cíl ověřit zjednodušení certifikačních procedur na základě generovaných dokumentů a výstupů z fáze modelování v prostředí MATLAB.

Abstract

The presented work deals with doctoral thesis named “Electrical drives for critical application”, which is solved in the Institute of Production Machines, Systems and Robotics. The paper tries to subsequently describe the progress during development of electric drive and to introduce the findings reached during project solving. The critical application requirements have been defined at the beginning, especially for the aerospace industry point of view. The work deals with the architecture of the control and power electronic, control software algorithms of the brush and brush-less BLDC motor with respect to the final certification aspects. It is also discussed the effectiveness of the new development methods based on the modeling and simulation. The Model Based Design approach have been proved and verified during aircraft onboard equipment development. The findings of these are discussed at the end of this work.

Klíčová slova

Elektronicky komutovaný motor, modelování, simulace, Model Based Design, kritické aplikace, letecký průmysl

Keywords

Electronically commutated motor, modeling, simulation, Model Based Design, critical application, aerospace industry

Bibliografická citace

HUBÍK, V. *Elektrické servopohony pro kritické aplikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 95 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Vladislav Singule, CSc.

Prohlášení autora

Čestně prohlašuji, že jsem disertační práci na téma Elektrické servopohony pro kritické aplikace vypracoval samostatně pod vedením svého vedoucího doktorské práce s použitím odborné literatury, kterou jsem citoval v seznamu použité literatury.

V Brně, dne

.....

Ing. Vladimír Hubík

.....

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat doc. Ing. Vladislavu Singulovi, CSc. za pomoc a metodické vedení při vypracování této práce. Rovněž bych chtěl poděkovat Ing. Istvánu Szabóvi, Ph.D. a Ing. Jiřímu Tomanovi za odbornou spolupráci v oblasti modelování a simulací.

Obsah

Abstrakt	2
Abstract.....	2
Klíčová slova	3
Keywords	3
Bibliografická citace	3
Prohlášení autora	4
Poděkování	4
Obsah	5
1 Úvod	8
2 Motivace a cíle disertační práce	10
2.1 Motivace k dané problematice.....	11
2.1.1 Kritické aplikace v letectví.....	11
2.1.2 Použití elektroniky v kritických úlohách v letectví	11
2.2 Cíle disertační práce.....	13
3 Současný stav poznání v oboru.....	15
3.1 Elektronicky komutovaný motor	16
3.1.1 Konstrukční varianty EC motoru.....	17
3.1.2 EC motory pro vysoké teploty	17
3.2 Princip řízení EC motorů – základní metody	18
3.3 Typy řízení EC motorů – skalární x vektorové	20
3.3.1 Skalární řízení.....	21
3.3.2 Vektorové řízení.....	22
3.4 Příklady řešení komerčních výrobců.....	23
3.5 Závěr k současnému stavu v oboru	25
4 Zvolená metodika řešení disertační práce	27

4.1	Obecná metodika návrhu mechatronické soustavy.....	27
4.1.1	Cyklus návrhu na mikroúrovni.....	27
4.1.2	Cyklus návrhu na makroúrovni.....	28
4.1.3	Vývojový „V“ cyklus v kritických aplikacích	29
4.2	Přístup k řešení disertační práce	32
5	Dosažené výsledky	33
5.1	Požadavky na HW navrhovaného pohonu.....	33
5.2	Řídicí a výkonová elektronika	35
5.2.1	Vývoj HW z pohledu násobného makrocyklu	35
5.2.2	Funkční vzorek výkonové elektroniky	36
5.2.3	Prototyp I. řídicí a výkonové elektroniky	38
5.2.4	Prototyp II. řídicí a výkonové elektroniky	40
5.2.5	Analýza spolehlivosti FMECA	43
5.3	Vývoj SW řídicí jednotky.....	47
5.3.1	Požadavky řídicího software	48
5.3.2	Přehled různých řídicích metod	51
5.3.3	Vhodná metoda řízení kritických aplikací.....	53
5.4	Modelování servopohonu	55
5.4.1	Modelování EC motoru v Simulinku	57
5.4.2	Identifikace systému, nastavení regulátorů	69
5.5	Měřicí stůl	78
5.5.1	Elektrická brzda	80
5.5.2	Mechanická brzda	81
5.5.3	Ovládací a zobrazovací jednotka	81
6	Přínosy disertační práce	83
7	Závěr	85
	Seznam použité literatury	87
	Seznam zkratk	89

Seznam příloh	90
---------------------	----

1 Úvod

V současné době jsou elektrické servopohony nedílnou součástí výrobních strojů, robotů, mobilních prostředků, zdravotnické techniky a dalších náročných aplikací. Jsou používány v podstatě ve všech oblastech průmyslu a služeb, kde je vyžadováno jakékoliv řízení mechanického pohybu, ať už lineárního nebo otáčivého. Z pohledu spolehlivosti můžeme servopohony rozdělit do více kategorií, které vyžadují odlišný přístup řešení během vývojové fáze. Kategorie kritických aplikací, pro které je spolehlivá a bezporuchová činnost základním předpokladem, vyžaduje přístup nejodpovědnější. Doktorská práce na téma „Elektrické servopohony pro kritické aplikace“ se zabývá právě touto oblastí, především s ohledem na řešení výkonové a řídicí elektroniky včetně vnitřních řídicích algoritmů.

Oblast elektrických pohonů prošla v posledních několika letech, současně s vývojem elektrotechniky a technologií, značnou revolucí. Během ní vznikly nové typy elektrických pohonů a nové způsoby řízení, které vyžadují komplexní řešení řídicí i výkonové elektroniky. Tyristorová můstková zapojení s diskrétní řídicí logikou byla nahrazena moderními spínacími tranzistory typu MOSFET a IGBT, řízenými speciálně uzpůsobenými typy signálových procesorů DSP pro řízení elektromotorů. Modernizovány byly také systémy ochrany, měření a další podpůrné obvody, zvyšující provozní spolehlivost.

Existence rychlých řídicích čipů a sofistikovaných algoritmů nepřináší pouze snadnou integraci elektrického servopohonu do nadřazených celků a systémů, ale přináší také nové trendy v oblasti elektrických pohonů. Vznikají nové typy stejnosměrných i střídavých elektrických motorů, které postupně vytlačují stávající, dobře prozkoumané a popsané komutátorové stroje, používané již několik desítek let. Mezi velmi populární patří v poslední době stále častěji diskutovaný elektronicky komutovaný stejnosměrný motor – EC motor, z anglosaské literatury známý jako BLDC motor. Vzhledem k příznivým vlastnostem, především z pohledu spolehlivosti, jsou EC motory vhodnými kandidáty pro aplikace vykazující kritické parametry, a tudíž i pro dlouhodobý a bezporuchový provoz.

Následující práce pojednává o dosavadním vývoji a řešení doktorské práce, která se zabývá především problematikou návrhu elektrického servopohonu pro oblast letecké techniky. Důraz je kladen na implementaci nového způsobu senzorového i bezsenzorového řízení EC motorů, a to jak při rozběhu, tak i v normálním provozu. Předložená doktorská práce obsahuje matematické modelování daného problému v prostředí softwaru MATLAB/Simulink s následným ověřením výsledků ve zkušebním hardware dSPACE. Tento postup, označován jako Model Based Design, tvoří již dnes nedílnou součást moderního vědeckého přístupu.

Výstupem doktorské disertační práce je i fyzická realizace řídicí a výkonové elektroniky pro pohony založené na elektronicky komutovaném stejnosměrném motoru. Lze očekávat praktické nasazení a ověření výsledků práce na komerčních projektech externí společnosti.

2 Motivace a cíle disertační práce

Z hlediska bezpečnosti je rozhodující, jakou škodu (především na lidském zdraví a životech) může chybná funkce (případně nefunkce) řídicího systému způsobit. S tím úzce souvisí četnost takových událostí. Zatímco prakticky každodenně dochází k úmrtím v silniční dopravě, a tato skutečnost je společností tolerována, letecké či železniční katastrofy jsou společensky vnímány daleko citlivěji. O událostech v jaderných elektrárnách raději ani nemluvě. Tento fakt souvisí s rozsahem katastrofy, kterou může daná chyba způsobit (kolik lidí může zabít). Je zajímavým psychologickým jevem [1], že v některých případech jsme ochotni svou osobu automaticky považovat za potencionální oběť katastrofy (letecká doprava), zatímco v jiných případech nikoli (silniční doprava). To zřejmě úzce souvisí s pocitem vlastní kontroly procesu, resp. nemožnosti v případě letecké dopravy vlastními silami daný proces ovlivnit.

Je paradoxem, že tento falešný pocit stále přetrvává, i když dnešní technické řídicí systémy jsou o mnoho řádů bezpečnější a spolehlivější než sebelépe trénovaný člověk. Zatímco pravděpodobnost poruchy dnes nasazovaných řídicích systémů pro bezpečnostně kritické aplikace bývá lepší než 10^{-9} , pravděpodobnost selhání člověka se běžně uvažuje jako 10^{-3} . To znamená, že zatímco jedno z tisíce lidských rozhodnutí bývá špatné, technický systém, který by prováděl jedno bezpečnostně relevantní rozhodnutí za sekundu, udělá jednu chybu za 32 let. Člověk při stejném pracovním tempu selže každých 17 minut.

Řídicí systémy mají jedinou podstatnou slabinu – navrhují je lidé, a ti, jak je uvedeno výše, chybují. I přesto je možné navrhnout systémy, které jsou o šest řádů spolehlivější než jejich tvůrci.

2.1 Motivace k dané problematice

2.1.1 Kritické aplikace v letectví

Vývojový trend v letecké technice [2] v posledních letech směřuje k implementaci výkonově optimalizovaných letounů (*Power Optimized Aircraft*) za využití metod *Fly-By-Wire* a *Power-By-Wire*, přičemž elektrohydraulické (EHA) a elektromechanické (EMA) prvky, inteligentní palivová čerpadla, atp. jsou typickými reprezentanty této moderní techniky.

V současné době je výkon pro hydraulické akční členy dodáván centrální hydraulickou jednotkou, která trvale poskytuje potřebný tlak pro všechny hydraulické okruhy v letadle, přičemž pohyb akčních členů je ovládán prostřednictvím ventilů. Tento způsob má značné množství nevýhod, mezi něž patří především velká celková hmotnost hydraulických okruhů, složitá instalace a náročná údržba. Naopak výhodou tohoto tradičního řešení je jeho spolehlivost a technická nenáročnost.

V případě použití EHA/EMA je do lokálních hydraulických okruhů dodáván tlak pouze podle potřeby a jeho velikost závisí na aktuální velikosti a typu zátěže. Nahrazení centrálního hydraulického okruhu akčními členy EHA a EMA má za následek nejenom výrazné snížení celkové hmotnosti systému, ale i jednodušší zástavbu a údržbu během provozu letadla s možností jednoduše zaměnit jednotlivé prvky. Moderní číslicové řídicí systémy umožňují kromě implementace pokročilých metod řízení také sledovat a diagnostikovat celý systém.

Důležitou částí každého akčního členu EHA/EMA je elektrický pohon s bezkartáčovým motorem (BLDC), jehož vlastnosti významnou měrou ovlivňují výkon a spolehlivost celého akčního členu. Proto musí být výběru motoru, návrhu řídicí a výkonové elektroniky, ovládacích algoritmů a testovacích procedur věnována patřičná pozornost.

2.1.2 Použití elektroniky v kritických úlohách v letectví

Použití EHA/EMA v kritických úlohách s sebou nese značné požadavky jak na samotné motory, tak na řídicí elektroniku i řídicí algoritmy. Akční členy jsou většinou používány ve velmi náročných klimatických podmínkách, při teplotách od -40 do +80 °C, s vysokými požadavky na rychlý a spolehlivý rozběh motoru,

jeho plynulé řízení i kontrolované zastavení, popř. rychlou reverzaci smyslu otáčení. Tyto požadavky jsou ještě zdůrazněny požadavkem na co nejmenší velikost a nízkou cenu celého zařízení.

Koncová cena systému je výrazně snížena zlepšující se dostupností komerčně vyráběných součástek, tzv. *Commercial-Off-The-Shelf* (COTS), které začínají běžně splňovat požadavky na teplotní odolnost i spolehlivost kritických úloh v letectví. Díky velkému výběru potřebných komponent systému je možné sestavit řídicí systém EC motoru přesně podle požadavků příslušné úlohy.

Vývoj software i hardware pro letecké aplikace dnes probíhá především podle požadavků příslušných norem RTCA/DO-178 [3] , RTCA/DO-254 [4] a RTCA/DO-160 [5] . Tyto rozlišují 5 kategorií podle stupně selhání příslušného prvku na celkovou činnost letadla, viz. Tab. 1. Normy rovněž předepisují celý vývojový cyklus od plánování, vývoje, ověřování, testování až po management kvality a výrobu.

Tabulka uvádí přehlednou formou nároky, jaké jsou kladeny na elektroniku na palubě letadla. Pro nejkritičtější třídu letadel a katastrofickou kategorii poruchy musí splňovat zařízení pravděpodobnost poruchy nižší než 10^{-9} na jednu letovou hodinu. Takové číslo lze dosáhnout za použití mnohonásobného zálohování funkcí a odlišným vývojovým přístupem. Mezi zařízení, která musí splňovat tyto vlastnosti, patří např. hlavní palivová čerpadla, řídicí jednotky hlavních pohonů, akční členy pro řízení směru letu, atd.

Certifikace zařízení, která splňují nejvyšší stupně bezpečnosti, tzn., že patří do kategorie selhání – hazardní a katastrofická, je rovněž velmi nákladný a časově náročný proces vývoje. Je proto snaha tyto náklady snížit na únosnou mez za použití nových vývojových postupů a technologií. Udávaná finanční náročnost certifikace a prokázání bezpečnosti ve třídách „*Nebezpečné/Katastrofické*“ činí až 150% nákladů na vývoj samotného zařízení.

Používání moderních vývojových prostředků v oblastí hardware, software, matematicko-fyzikálních modelovacích programů a dalších podpurných aplikací efektivně snižuje výsledné náklady. Součástí disertační práce je využití a ověření využitelnosti těchto prostředků při vývoji kritických servopohonů v letecké technice.

Tab. 1. Klasifikace poruchových stavů zařízení.

Klasifikace poruchových stavů	Bez vlivu na bezpečnost	Nezávažné (minor)	Závažné (major)	Nebezpečné (hazardous)	Katastrofické (catastrophic)
Důsledek pro letadlo	Žádný důsledek pro provozní schopnosti a bezpečnost	Mírné snížení funkčních schopností nebo rezerv bezpečnosti	Významné snížení funkčních schopností nebo rezerv bezpečnosti	Velké snížení funkčních schopností nebo rezerv bezpečnosti	Běžně zahrnuje zkázu trupu
Důsledek pro cestující	Nepohodlí pro cestující	Fyzické potíže pro cestující	Fyzické strádání u cestujících včetně možných zranění	Vážné nebo smrtelné zranění jednoho cestujícího	Několikanásobné smrtelné zranění cestujících
Důsledek pro letovou posádku	Bez důsledku pro letovou posádku	Mírný nárůst pracovního zatížení posádky nebo použití nouzových postupů	Fyzické potíže nebo značný nárůst pracovní zátěže	Fyzické ztrádání nebo nadměrné pracovní zatížení posádky narušuje schopnost plnit úkoly	Smrtelná zranění nebo zbavení způsobilosti

Rozdělení letadel	Přípustné pravděpodobnosti selhání (na 1 letovou hodinu)				
Třída 1	Požadovaná pravděpodobnost	$< 10^{-3}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-5}$	$< 10^{-6}$
Třída 2		$< 10^{-3}$	$< 10^{-5}$	$< 10^{-6}$	$< 10^{-7}$
Třída 3		$< 10^{-3}$	$< 10^{-5}$	$< 10^{-7}$	$< 10^{-8}$
Třída 4		$< 10^{-3}$	$< 10^{-5}$	$< 10^{-7}$	$< 10^{-9}$

2.2 Cíle disertační práce

Cílem disertační práce je návrh řídicího systému elektronicky komutovaného (EC) motoru, s předpokládanou implementací především pro oblast kritických aplikací v letectví. Důraz bude kladen i na rozběhovou fázi, při které není známa aktuální poloha rotoru vůči vektoru magnetického toku statoru motoru. Správná volba sepnutí výkonového polovodičového stupně při startu je klíčová pro zajištění správného a spolehlivého chodu. Vyvinutý algoritmus musí navíc splňovat částečné požadavky na variabilitu připojeného motoru a zátěžného momentu na hřídeli při rozběhu. Součástí disertační práce bude i analýza pracovních charakteristik pohonu.

Jedním z dílčích cílů práce je vývoj hardware řídicího systému, který bude tvořen blokem výkonové elektroniky a odpovídající mikroprocesorovou jednotkou. Jednotlivé části budou vytvořeny samostatně z důvodu snadného přizpůsobení konkrétním požadavkům cílové aplikace, především mechanického subsystému. Modulární struktura je výhodná i pro nezávislé inovování jednotlivých částí. Limitujícím faktorem je maximální příkon

použitého pohonu, jmenovitě do 500 W při stejnosměrném napájecím napětí do 30 V.

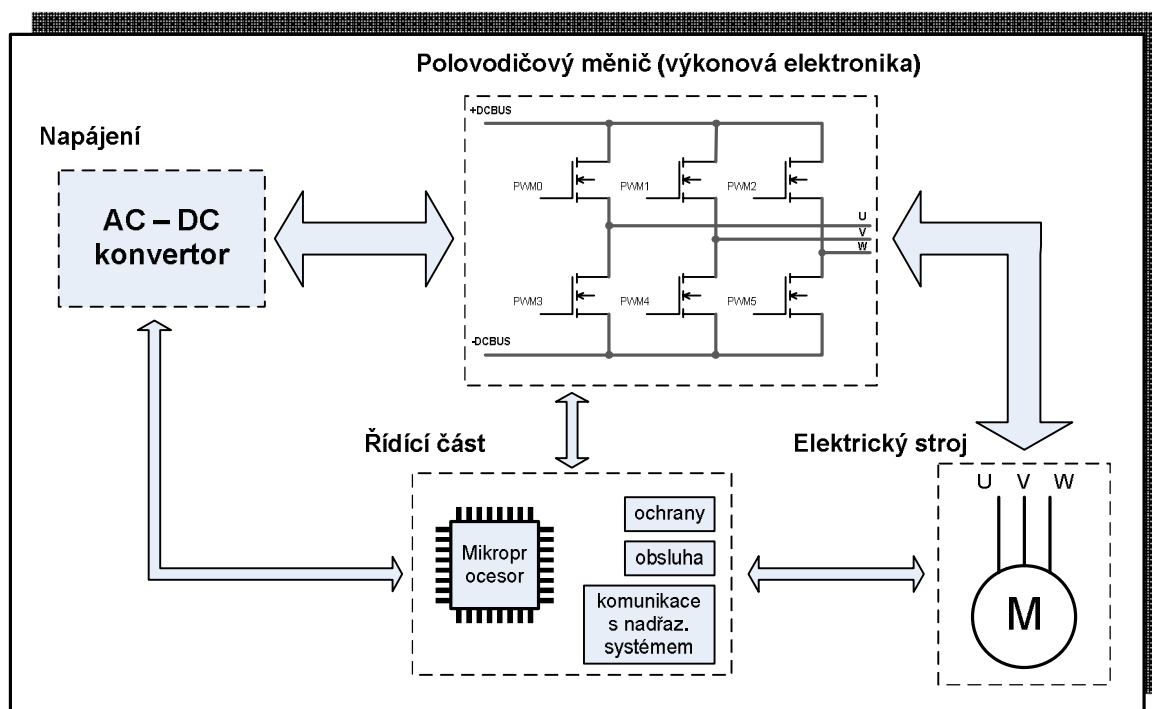
Při vývoji řídicího systému bude kladen zvláštní důraz na spolehlivost a bezpečnost daného řešení, jak bylo nastíněno v úvodní části této práce. Veškeré vývojové práce budou probíhat na základě metody *Model Based Design*. To znamená, že před fyzickou realizací jednotlivých modulů bude provedena analýza a modelování v prostředí MATLAB/Simulink.

Neodmyslitelnou součástí řídicí mikroprocesorové desky je vnitřní firmware signálového procesoru, jehož vývoj, ověření a implementace tvoří další dílčí cíl práce. Vytvořený software přesně specifikuje základní parametry celého servopohonu, jeho chování a velkou měrou se podílí i na celkové spolehlivosti zařízení. Vzhledem ke složitosti řízení EC motorů, především v kritických aplikacích, bude vývoj a verifikace řídicích algoritmů podstatnou částí řešení práce. Pro vývoj těchto algoritmů bude opět použito metody *Model Based Designu*, která mimo jiné i podporuje automatické generování strojového kódu pro danou cílovou platformu. To značně urychluje vývoj a hledání optimálního řešení.

3 Současný stav poznání v oboru

Elektrický servopohon je soustava vytvořená z vhodné kombinace elektrických zařízení pro elektromechanickou přeměnu energie a vytváření, přenos a zpracování signálů řídících tuto elektromechanickou přeměnu [8]. Vstupní řídící signály jsou určeny obsluhou nebo nadřazeným řídícím, regulačním nebo automatizačním členem. Výstupní veličiny těchto členů zpravidla odpovídají parametrům požadovaného mechanického pohybu.

Ještě v polovině minulého století byl hlavní částí elektrického servopohonu elektrický motor. Jeho ostatní komponenty představovaly technicky i cenově pouze zanedbatelnou část. Rozvoj výkonové elektroniky, řídící techniky a mikroprocesorů od druhé poloviny minulého století zásadně ovlivnil vědní obor elektrické servopohony. Základní struktura soudobého elektrického pohonu je graficky znázorněna na **Obr. 1**.



Obr. 1 Struktura moderního elektrického pohonu.

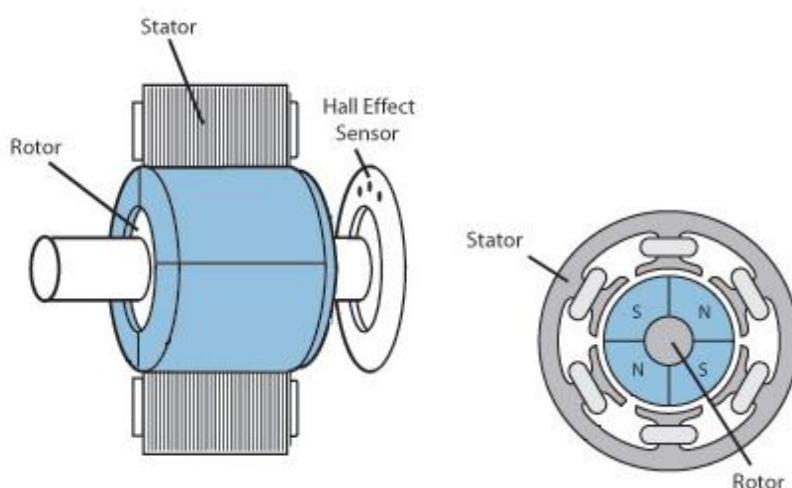
Pokud vypustíme mechanickou část servopohonu, která je většinou přizpůsobena na míru danému pracovnímu mechanismu, lze zařízení rozdělit na tři hlavní bloky. Řídicí část tvořenou odpovídající mikroprocesorovou jednotkou, výkonovou část s polovodičovými spínacími prvky a elektrický stroj. Vzhledem k tématu disertační práce bude další pozornost věnována pouze

konkrétnímu řešení na bázi elektronicky komutovaného (EC) motoru s příslušnou elektronikou a řídicím firmware mikroprocesoru. Dalším omezením bude rozsah výkonu pohonu do 500 W při bezpečném stejnosměrném napájení 28 V používaným v letecké technice.

3.1 Elektronicky komutovaný motor

Elektronicky komutovaný motor, jeho struktura je na Obr. 2, je obvykle považován za bezkartáčový stejnosměrný motor (*Brushless DC motor - BLDC*), avšak principiálně je střídavým synchronním motorem. Na rozdíl od klasického DC motoru s komutátorem a kartáči je rotorová část BLDC motoru tvořena permanentními magnety a statorová třemi fázovými vinutími. Ta jsou většinou zapojena do hvězdy se vzájemným posunutím o 120° . BLDC motory se však konstruuji i jako vícepólové systémy, přičemž princip řízení zůstává stejný. Za předpokladu nahrazení mechanického komutátoru komplexním elektrickým systémem je pro jeho modelování možné vycházet z principu klasického stejnosměrného motoru [9] .

Výhody jsou oproti klasickým stejnosměrným motorům zcela evidentní. Absence mechanického komutátoru zvyšuje spolehlivost, účinnost i životnost. Snižuje se produkovaný hluk a odpadá jiskření klasických kartáčových sběračů. Tím se významně redukuje elektromagnetická interference. K nevýhodám patří poměrně složitý řídicí systém.



Obr. 2 Struktura elektronicky komutovaného motoru s Hallovými snímači.

3.1.1 Konstrukční varianty EC motoru

Konstrukční uspořádání EC motorů [10] v podstatě odpovídá uspořádání motoru synchronního s trojfázovým vinutím na statoru a permanentními magnety na rotoru. Chování je však obdobné jako u motoru stejnosměrného – tzn. přímá vazba mezi napětím a otáčkami, proudem a točivým momentem.

V nabídce nejznámějších výrobců EC motorů lze nalézt dvě základní konstrukční provedení, a to motory s homogenním vinutím a motory se soustředěným vinutím umístěným na pólech statoru. Obě tyto koncepce mají svoje přednosti a nedostatky a z toho plynoucí oblasti použití.

Výhodou motorů EC oproti DC je vyšší životnost, dosažitelnost vyšších otáček (desítek tisíc), přičemž trvalé maximální otáčky jsou omezeny spíše konstrukcí a životností ložisek. Naproti tomu však maximální trvalý moment s otáčkami klesá. To je způsobeno tím, že magnetický tok ve statoru se cyklicky mění s otáčením permanentního magnetu na rotoru. Proměnlivý magnetický tok vyvolává ztráty v železe, které s rostoucími otáčkami také rostou. Pro omezení těchto ztrát jsou plechy paketu statoru vyráběny ze speciálních slitin. Podstatnou výhodou celé aplikace je nižší výrobní cena a i přes vyšší složitost menší rozměry elektroniky v porovnání s pohony s DC motorem.

3.1.2 EC motory pro vysoké teploty

Jeden z kritických požadavků servopohonů pro leteckou techniku je rozšířená teplotní pracovní oblast motorů a jejich řídicích elektronik. Vzhledem k tomu, že elektrický servopohon se může fyzicky nacházet na libovolném místě letadla, je nutné počítat se zápornými teplotami od -55°C (venkovní teplota letových hladin) až do kladných teplot cca $+125^{\circ}\text{C}$ (to odpovídá umístění v blízkosti pohonné jednotky letadla – čerpadla paliva, atd.).

Teplota okolí podstatně ovlivňuje vlastnosti komponent motorů [11], převodovek, snímačů a elektroniky. K posouzení vhodnosti motoru pro dané podmínky nestačí znát jenom teplotu okolí, ale i zatížení a otáčky motoru. Přípustné teploty snímačů a elektroniky jsou zpravidla nižší (70° - 100°C pro snímače, do 80°C pro elektroniku). Jejich integrace do motoru tedy značně snižuje odolnost celého pohonu proti zvýšené teplotě.

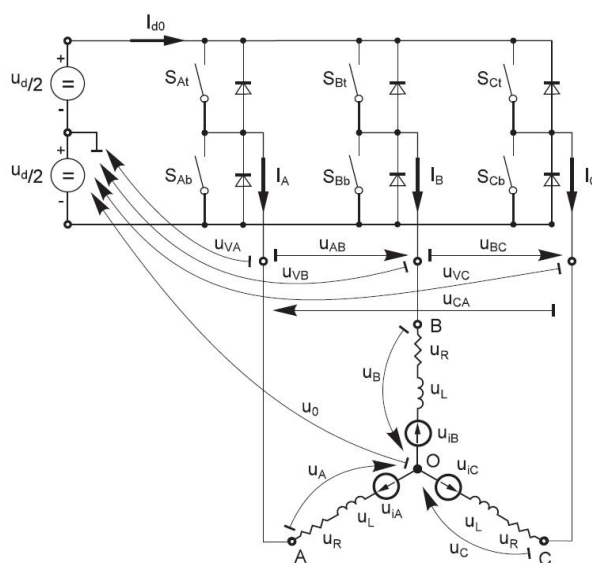
Hlavním zdrojem tepla, který zahřívá každý motor, jsou ztráty na činných odporech vinutí a ztráty v magnetickém obvodu (vířivými proudy a hysterezní

ztráty). Ztráty v magnetickém obvodu vznikají pouze v motorech, v jejichž magnetickém obvodu existuje časově proměnné magnetické pole. Jsou to tedy klasické komutátorové motory, ale i motory s elektronickou komutací (EC motory). S otáčkami motoru roste frekvence změn magnetického pole a úměrně také ztráty v magnetickém obvodu.

3.2 Princip řízení EC motorů – základní metody

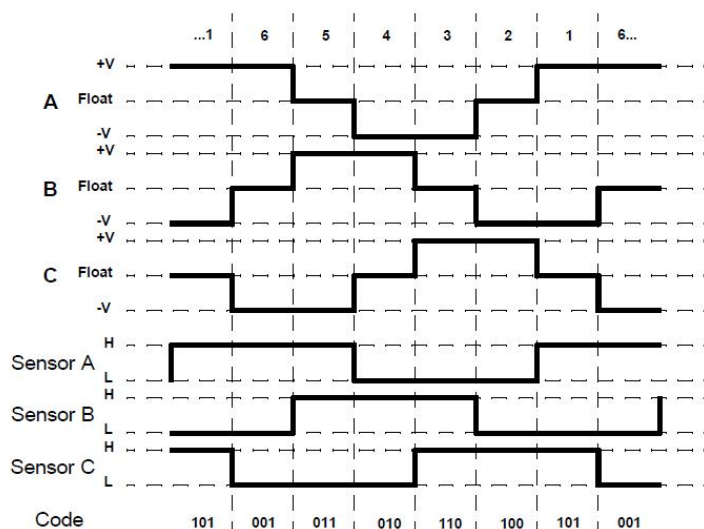
Jak již bylo uvedeno výše, elektronicky komutovaný motor se chová podobně jako stejnosměrný motor [9]. Otáčky jsou úměrné napětí, připojenému na vinutí statoru. Připojování jednotlivých vinutí je odvozeno od polohy rotoru, na němž jsou umístěny permanentní magnety. Moment motoru je úměrný proudu vinutím.

Přepínání proudu do jednotlivých statorových vinutí se provádí bezkontaktně tranzistorovými spínači a střední hodnota napětí v intervalu vedení proudu je řízena pulzní šířkovou modulací (PWM). Zapojení výkonového měniče pro napájení EC motoru je shodné se zapojením napěťových měničů frekvence pro střídavé asynchronní a synchronní motory, viz Obr. 3. Funkce se liší pouze způsobem řízení, kde proud teče současně všemi třemi fázemi a má kvazisinusový tvar, zatímco u EC motorů je napájení v daném okamžiku vždy jen dvoufázové a tvar proudu je většinou obdélníkový (trapezoidální), příp. rovněž podobný sinusovému průběhu.



Obr. 3 Princip buzení jednotlivých vinutí EC motoru. [20]

Ukázka časování jednotlivých fází v závislosti na poloze rotoru je znázorněna na Obr. 4. Uvedený příklad zobrazuje 6 komutačních kroků, které jsou určeny kombinací 3 vstupních Hallových snímačů. Jedna komutační kombinace odpovídá 60° elektrickým. Na základě kombinací Hallových snímačů, lze vytvořit kombinační tabulku, která určuje směr otáčení CW nebo CCW (po/proti směru pohybu hodinových ručiček). Tato metoda je vhodná pro většinu servopohonů, kde rovnoměrnost chodu a proudová optimalizace pohonu nejsou základními požadavky. Rovněž řízení při nízkých otáčkách není s touto metodou zcela optimální. Navíc, při výpadku jednoho ze snímačů se pohon stává nefunkčním, pokud nejsou použity metody pro zabezpečení funkce i po výpadku.

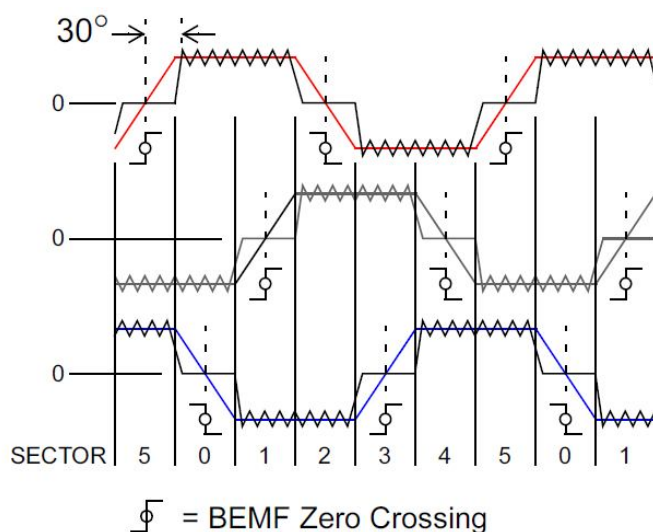


Obr. 4 Časování fází v případě senzorového řízení. [21]

V případě bezsenzorového řízení je aktuální poloha vyhodnocována z průběhu napětí na nenapájeném vinutí statoru. Tato metoda z principu neumožňuje využití metod, které vyžadují řízení všech fází současně, jako je například sinusové napájení při nízkých rychlostech. Umožňuje však vynechání snímačů polohy, které mohou být pro některé aplikace finanční přítěží.

Obr. 5 znázorňuje idealizované průběhy indukovaného napětí motoru při rotaci, tzv. *Back-EMF*, na všech 3 fázích. Vychází se ze znalosti mechanické stavby motoru a vzájemné polohy statorových vinutí a permanentních magnetů rotoru. Bod průchodu, kdy trapezoidální tvar napětí fáze (podle konstrukce může být i sinusoidální) prochází nulovou hodnotou, je v literatuře označován jako *BEMF Zero Crossing*. Na základě znalosti tohoto průchodu je možné

v následujících elektrických 30° přepnout napájení do dalšího komutačního stavu.



Obr. 5 Idealizované průběhy indukovaného napětí na volných fázích. [22]

Je proto nezbytné vypočítat potřebný čas od průchodu napětí nulovou hodnotou, který odpovídá požadované rychlosti. To je nutné provádět s dostatečnou rychlostí v řádu jednotek mikrosekund.

3.3 Typy řízení EC motorů – skalární x vektorové

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, současný stav elektrotechniky rozeznává několik druhů řízení elektronicky komutovaných motorů. Výběr vhodného způsobu je většinou ovlivněn požadavky aplikace, ve které je motor nasazen. Mezi základní kritéria rozhodování patří především pracovní otáčky pohonu, pracovní krouticí moment rotoru a také požadavek na spolehlivou činnost zařízení. Dalším ovlivňujícím faktorem je i požadavek na dynamické chování soustavy. V současném světě nelze opomenout ani finanční hledisko řešení.

Základní rozdělení způsobů řízení je částečně převzato i z technologie řízení asynchronních a synchronních motorů, kde je tato problematika celkem dobře známá a vcelku detailně zpracována. Pokud dodržíme veškeré odlišnosti mezi stavbou těchto druhů pohonů, lze toto dělení s výhodou použít. Jedná se tedy o základní skupiny řízení, tj. skalární a vektorové, příp. jejich další modifikace. Z důvodu absence mechanického komutátoru je třeba najít způsob napájení jednotlivých fází motoru. Je-li motor vybaven snímači, stává se řízení

jednodušší. Pokud je však provozován bezsenzorově, je nutné výše uvedené řídicí metody obohatit o způsoby rozlišení polohy rotoru s následným přepnutím do dalších fázových vinutí, jak již bylo vysvětleno v předchozí podkapitole.

3.3.1 Skalární řízení

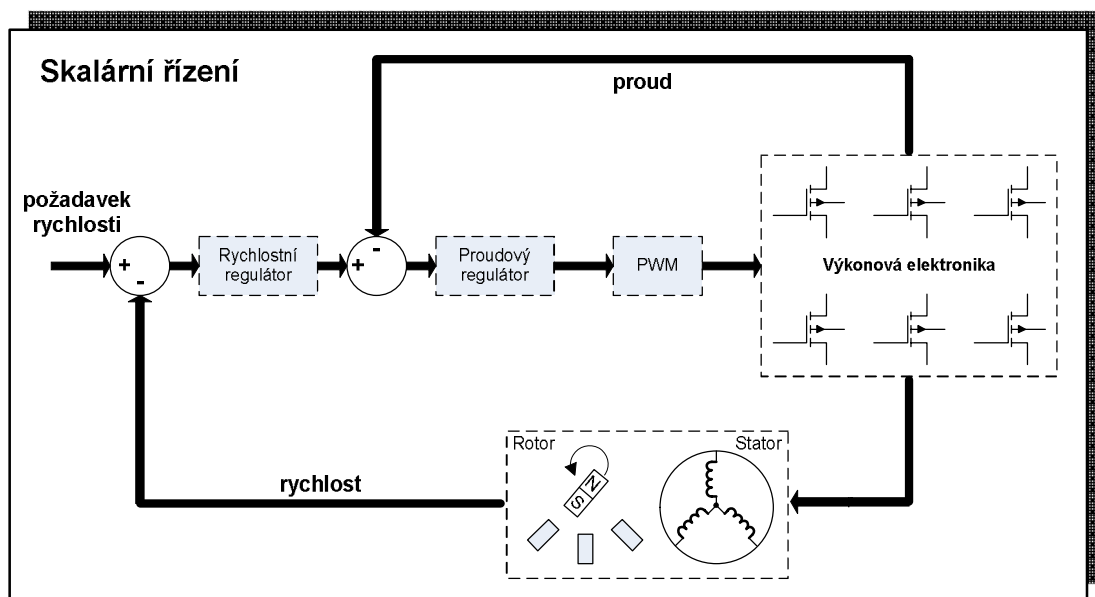
Skalární metoda řízení [8] výkonového polovodičového spínače pro napájení EC motoru je poměrně jednoduchá. Neumožňuje ale dosáhnout vysokého dynamického chování pohonů v přechodných stavech. Dnes je používána spíše v jednodušších provedeních pohonů nebo v dynamicky nenáročných aplikacích jako jsou pohony čerpadel nebo ventilátorů, kde lze očekávat konstantní zatížení a pomalé přechodové stavy. Typickým představitelem je tzv. kmitočtově – proudové řízení, jehož blokové schéma je na Obr. 6.

Tento typ řízení většinou obsahuje dvě uzavřené regulační smyčky – nadřazenou s rychlostním a podřízenou s proudovým regulátorem. Vstupní veličinou je většinou žádaná hodnota úhlové rychlosti rotoru. Ta je porovnána se skutečnou hodnotou a získaná regulační odchylka je vstupem regulátoru. Výstup rychlostního regulátoru odpovídá požadované hodnotě satorového proudu, která je porovnána s hodnotou skutečnou. Signál s informací o skutečné hodnotě je získán z proudového snímače, který je umístěn ve stejnosměrné napájecí větvi výkonové elektroniky. Výstupní signál proudového regulátoru je vstupem generátoru PWM signálu.

Při senzorovém řízení je motor obvykle vybaven trojicí Hallových snímačů nebo inkrementálním čidlem (IRC). Snímače v tomto případě slouží jak pro výpočet aktuální úhlové rychlosti, tak pro stanovení okamžiku přepnutí generátoru PWM signálu a výkonové elektroniky do následujícího fázového vinutí.

Skalární řízení lze použít i tehdy, nejsou-li k dispozici žádné snímače polohy. V takovém případě se jedná o bezsenzorové řízení. Určení polohy rotoru a přepnutí proudu do následující fáze probíhá na základě sledování indukovaného napětí v cívkách statoru, tzv. *Back electro-motive force voltage – back EMF*. To je možné měřit vždy na volné nenapájené cívce při použití běžného způsobu spínání. Tato metoda vyžaduje vyšší nároky na řídicí

elektroniku a neřeší detekci polohy při nízkých rychlostech rotoru, při kterých je hodnota indukovaného napětí příliš nízká.



Obr. 6 Blokové schéma skalárního řízení EC motoru.

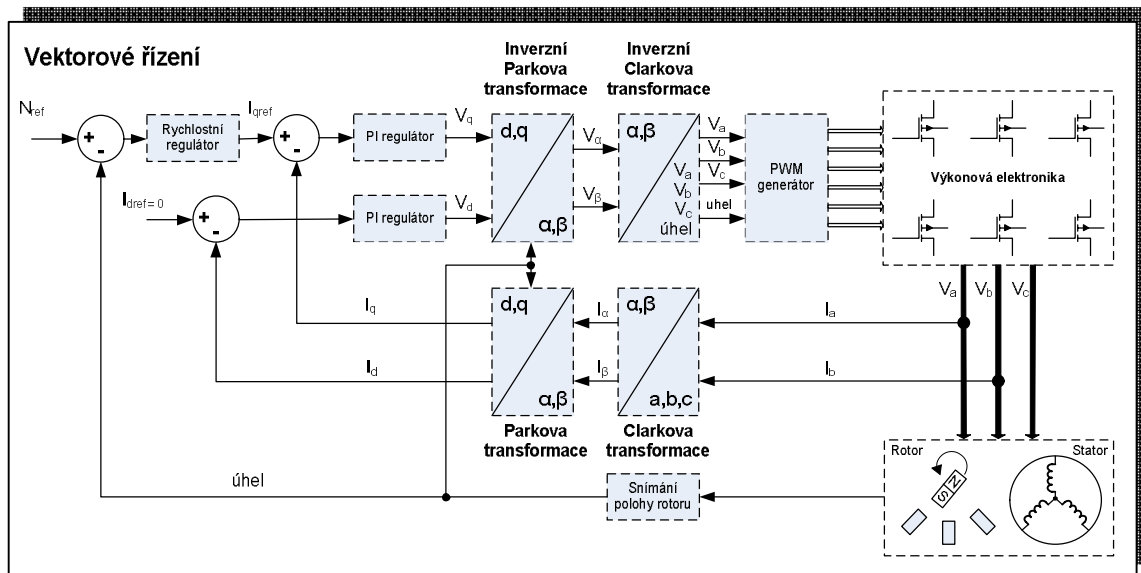
V současné praxi se používají různé modifikace skalárního řízení, především různé možnosti spínání výkonové elektroniky během komutačních kroků. Místo napájení pouze dvou vinutí motoru v jednom časovém okamžiku, což odpovídá pouze šesti možným kombinacím statorového proudu, lze použít i tzv. sinusoidální napájení všech tří cívek statoru. Tato metoda je obdobná řízení asynchronních motorů z frekvenčních měničů, které generují třífázový kvazisinusový proud se vzájemným posunutím fází o 120° . Pokud ale nejsou použity speciální metody určování aktuální polohy rotoru, je třeba při sinusoidálním řízení osadit motor snímačem polohy.

3.3.2 Vektorové řízení

Podstatou vektorově orientovaného řízení [8] [9] je rozklad vektoru statorového proudu do dvou složek I_d a I_q , tedy do os d a q , které se otáčejí synchronně s točivým magnetickým polem rotoru. Podle způsobu určení okamžité polohy systému os d a q se rozlišují jednotlivé metody na přímé a nepřímé. Blokové schéma tohoto řízení je na Obr. 7.

Z obrázku je patrné, že výpočetní nároky na řídicí jednotku jsou u tohoto způsobu řízení značně vyšší než u řízení skalárního. Nezbytný je také větší počet snímačů proudu a v případě senzorového vektorového řízení i kvalitnější snímač polohy. Základem této metody je snímání dvou fázových proudů motoru (třetí

je dopočítán) a jejich následná transformace pomocí Clarkova a Parkova algoritmu do systému os rotujících s rotorem motoru. Vzniknou tedy dvě složky, označované jako I_d a I_q , které odpovídají velikosti magnetického toku (I_d - tokotvorná) a velikosti momentu motoru (I_q - momentotvorná).



Obr. 7 Blokové schéma vektorového řízení EC motoru.

3.4 Příklady řešení komerčních výrobců

Většina velkých výrobců stejnosměrných nebo střídavých elektromotorů dodává ke svým výrobkům již hotové řídicí elektronické jednotky, obsahující i výkonové části. V této kapitole jsou uvedeny příklady významných světových firem, zabývajících výrobou a řízením EC motorů do výkonu 1 kW.

MAXON MOTOR

Firma maxon motor, ag., [16] patří ke špičce mezi výrobci kartáčových i bezkartáčových stejnosměrných motorů ve výkonové řadě do 500 W. Ke svým motorům nabízí systém řízení EPOS, ukázka je na Obr. 8. Slouží ke skalárnímu řízení senzorových i bezsenzorových EC motorů v aplikacích elektrických servopohonů. Komunikace s nadřazeným systémem je realizována sběrnicí CAN s protokolem CANopen.



Obr. 8 Řídicí jednotky EPOS společnosti maxon motor, ag.

ANAHEIM AUTOMATION

Firma Anaheim Automation [17] patří také mezi významné výrobce EC motorů, převodovek, senzorů, brzd, atd. Ve své nabídce má i řídicí jednotky pro senzorové motory s výkonem až 1,5 kW. Ovládání rychlosti otáčení je realizováno analogovým vstupem 0 až 5 VDC.



Obr. 9 Řídicí jednotka společnosti Anaheim Automation.

MICROCHIP

Firma Microchip [19] se především zabývá vývojem a výrobou 8, 16 a 32 bitových mikroprocesorů a signálových kontrolérů. Ve svém výrobním programu má značnou část produktů věnovanou řízení elektrických motorů všech druhů. Na Internetových stránkách <http://www.microchip.com> lze najít sekci *Motor Control Design Center*, ve které je velmi dobře propracovaná

technická podpora při vývoji elektrických servopohonů všeho druhu. Formou aplikačních poznámek jsou popsány metody skalárního i vektorového řízení EC motorů za použití produktů a procesorů fy Microchip. Součástí prezentace je i četná nabídka vývojových modulů výkonové a řídicí elektroniky pro první kroky v této oblasti elektroniky.

Mezi další výrobce podporující svými produkty oblasti řízení elektrických servopohonů patří například společnosti Freescale, Allegro, NXP, ST, AxioMatic, atd. Vzhledem k přítomnosti elektrického pohonu ve většině výrobků spotřební a průmyslové elektroniky lze počítat s tím, že každý větší výrobce bude mít ve své produktové nabídce položky související s řízením elektrických pohonů.

3.5 Závěr k současnému stavu v oboru

V předchozí kapitole je velice stručnou formou pojednáno o základních způsobech řízení elektronicky komutovaných motorů. Jak bylo naznačeno, mezi základní 2 metody z pohledu řízení statorových a rotorových veličin patří skalární a vektorové řízení, přičemž obě metody lze navíc aplikovat senzorově nebo bezsenzorově.

Většina produktů renomovaných firem slouží k senzorovému skalárnímu řízení elektronicky komutovaných motorů. Jedná se spíše o řešení „na míru“ podle konkrétních požadavků zákazníka. Nabízené moduly však nesplňují požadavky na senzorové a bezsenzorové řízení a nelze je ani použít v oblasti kritických aplikací v letectví z důvodu nedostatečných parametrů (dynamika, přesné polohování, řízení rychlosti) a absence certifikací podle příslušných leteckých norem.

Na druhou stranu, požadavky na vyšší metody řízení (vektorové řízení, DTC, predikce polohy pomocí estimátorů, atd.) jsou implementovány do řízení pohonů s asynchronními a synchronními motory. Jejich použitím při řízení EC motorů se většinou zabývají pouze technické univerzity a výzkumná centra, především v rámci řešení individuálních projektů. Je to z důvodu poměrně vysoké náročnosti těchto metod, především během implementaci připravených algoritmů do současné řídicí elektroniky. Výkonová a rozsahová náročnost většiny metod nedovoluje jejich použití při řízení kritických servopohonů.

Prokázání spolehlivosti a bezpečnosti takto rozsáhlých řídicích algoritmů je zpravidla nejobtížnější část celého řešení.

Motivací této disertační práce je proto vývoj elektroniky a řídicího algoritmu pohonu, který bude splňovat definované vlastnosti a kritéria pro nasazení v kritických aplikacích. Je zřejmé, že je potřeba nalézt kombinaci známých metod řízení a najít nejschůdnější řešení z hlediska velikosti kódu, výpočetní náročnosti a výsledné optimalizace regulačních procesů.

Vývojový proces takového zařízení bude probíhat podle nastíněného vývojového „V cyklu“ za použití metod modelování, t.zv. „*Model Based Designu*“ a s podporou optimalizačních metod vycházejících z celkového modelu řízeného systému.

4 Zvolená metodika řešení disertační práce

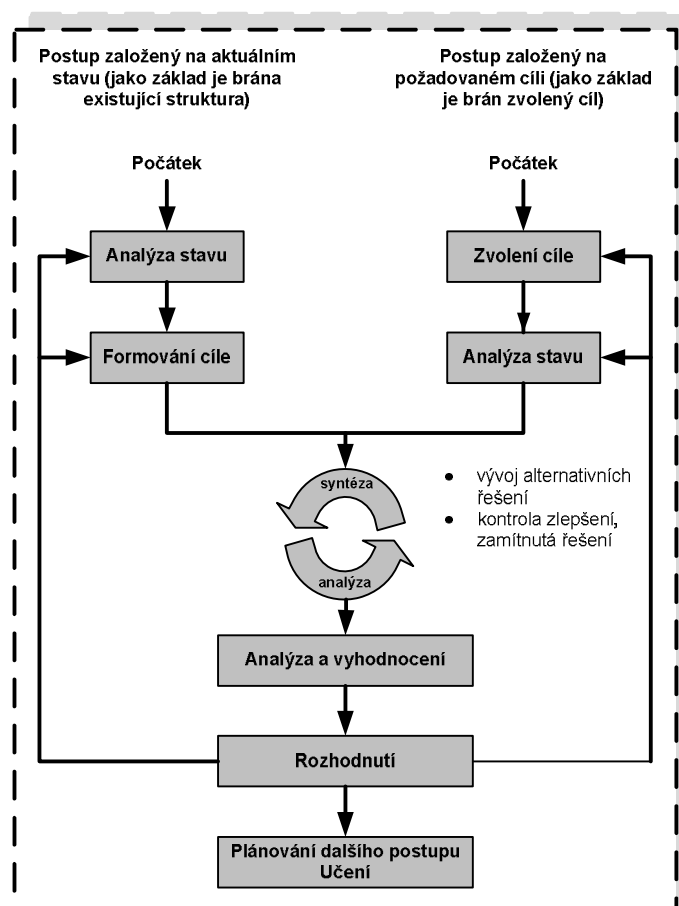
4.1 Obecná metodika návrhu mechatronické soustavy

Za optimální postup návrhu mechatronických soustav podle [7] je považován flexibilní model procesu, který je v podstatě postaven na následujících krocích:

- cyklus návrhu na mikroúrovni,
- cyklus návrhu na makroúrovni.

4.1.1 Cyklus návrhu na mikroúrovni

Tento cyklus je využíván konstruktérem výrobku, který se zabývá předvídatelnými problémy, obvykle při oborově-specifickém návrhu. Organizace obsluhy mikrocyklu, která je uvedena na Obr. 10, vznikla v systémovém inženýrství a byla přejata v modifikované formě do dalších odvětví, jako je např. obchodní management, softwarové inženýrství, atp.



Obr. 10 Cyklus návrhu na mikroúrovni (mikrociklus).

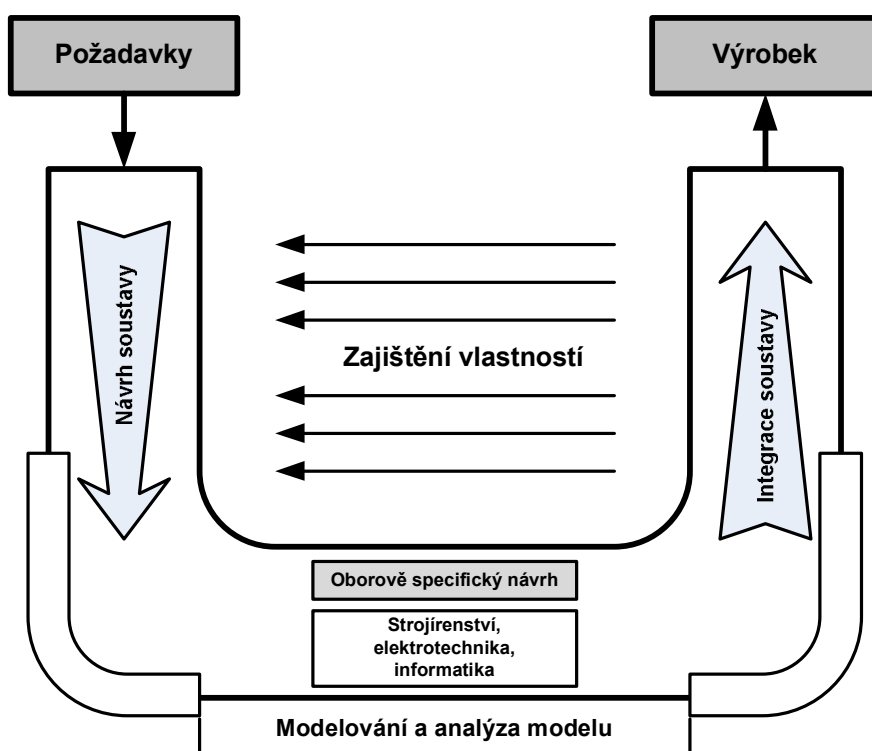
4.1.2 Cyklus návrhu na makroúrovni

Tento cyklus podle Obr. 11 popisuje obecně použitelný postup pro navrhování mechatronických soustav (včetně elektrických zařízení) a může mít případ od případu částečně odlišnou podobu.

Navrhováním rozumíme proces, který vychází z požadavků a vede ke konkrétní technické soustavě. Zde je tato konkretizace vyjádřena mechatronickými prvky a interakce mezi nimi.

Požadavky

Počáteční bod je tvořen aktuálními vývojovými požadavky. Definovaná soustava (výrobek) je určena přibližně a je popsána formou požadavků. Tyto požadavky se vztahují k výrobku a jsou poté vyhodnoceny.



Obr. 11 Cyklus návrhu na makroúrovni (makrocyklus).

Výrobek

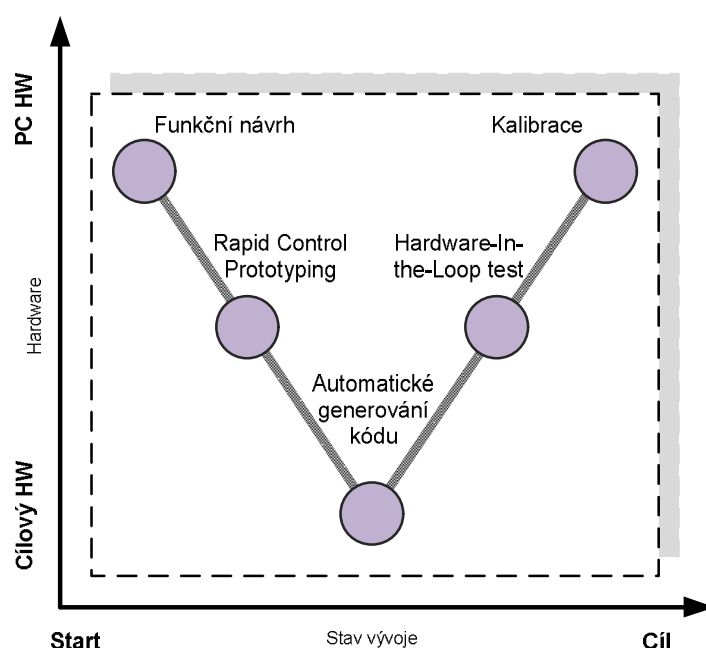
Výrobek je výsledkem nepřetržitého makrocyklu. V této souvislosti je výrobek chápán ve významu nikdy neukončeného procesu. Budoucí výrobek můžeme vytvořit zlepšováním skutečného, již existujícího výrobku – zvyšujeme *zralost* výrobku. Stupni zralosti výrobku jsou např. laboratorní vzorek, funkční vzorek, prototyp, atd.

V prvním cyklu je výrobek funkčně určen, jsou vybrány, přibližně nadimenzovány a zkontrolovány (s ohledem na činnost celé soustavy) *první principy činnosti* a nebo *prvky řešení*. Výrobek je realizován obvykle ve formě laboratorního vzorku. Princip činnosti popisuje vztah mezi fyzikálním účinkem a rozměrovými a materiálovými vlastnostmi (skutečné rozměry, skutečný pohyb a materiál). Jsou realizovány jednotlivé prvky soustavy, na kterých je odzkoušen princip činnosti. Jedná se obecně o moduly a různé podsestavy.

Následnou konkretizací v druhém cyklu, kde jsou stanoveny konečné rozměry řešených prvků a provedena simulace chování a skutečného provedení. Je vytvořen první funkční vzorek. V závislosti na postupu práce na návrhu a na typu a složitosti vývojového úkolu mohou být pro připravenost výrobku k sériové výrobě požadovány další makrocykly, např. fáze prototypu. Počet makrocyklů a provedených kroků závidí na druhu vývojového úkolu.

4.1.3 Vývojový „V“ cyklus v kritických aplikacích

Vývoj kritických aplikací v leteckém průmyslu, podobně jako v průmyslu automobilovém, je ovlivněn moderními vědeckými trendy a postupy. Uplatňují se zde s výhodou metody známé z odborných literatur jako *Model Based Design* a *Rapid Control Prototyping* [6]. S tím také velmi úzce souvisí pojem vývojový „V“ cyklus, který je dílčí konkretizací výše uvedeného makrocyklu.



Obr. 12 Vývojový „V“ cyklus.

Zobrazením „V“ cyklu je obrazec podle Obr. 12, který graficky vyjadřuje postup softwarových i hardwarových vývojových prací složitých řídicích systémů. Je založen na detailním matematickém modelu celého systému v příslušném počítačovém prostředí, např. MATLAB. Jeho výhodou je intuitivní přirozenost, jednoduché použití a přenositelnost na libovolné cílové platformy. Vývoj založený na modelování (*Model Based Design*) přináší značnou úsporu časových i finančních nákladů. Vývojovým pracovníkům dále nabízí kompletní přehled a kontrolu celého vytvářeného systému v integrovaném grafickém prostředí.

Úplný návrh systému se skládá z několika kroků – funkční návrh, *Rapid Control Prototyping*, automatické generování kódu (do HW testovací platformy), *Hardware-In-the-Loop* (HIL) testování a finální kalibrace. Výčet jednotlivých kroků odpovídá pořadí prací při vývoji.

První etapou funkčního návrhu je vytvoření modelu a počítačová simulace uzavřené řídicí smyčky, tzn. model řízeného systému (*plant model*) a řídicího systému. Takto vytvořené modely jsou zatím pouze symbolické, ve tvaru daném použitým simulačním prostředím. Pokud je systém vytvořený a výsledky simulace odpovídají definovanému zadání, začnou se jednotlivé algoritmy ověřovat v reálném čase a v reálném hardware. Tato fáze je nazývána *Rapid Control Prototyping* (RCP).

RCP je proces, při kterém se ověřují vytvořené řídicí bloky na real time počítači a na reálném nebo opět modelovaném systému. Počítačový model je použitý v případě, že chybná funkce řídicího systému může způsobit vážné poškození řízeného zařízení nebo ztráty na životech. Největší výhoda použití integrovaného prostředí pro modelování, simulaci a tvorbu prototypů je, že vývojový pracovník nepotřebuje znát C kód a nemusí mít dostatek zkušeností s implementací softwaru do reálného cíle. V následující fázi je z matematického modelu automaticky generován a kompilován zdrojový kód, který představuje chování celého systému. Dochází tak k dramatickému zkrácení vývojového času oproti klasickému vývojovému cyklu při stálém zachování soudržnosti mezi zadáním a realizační etapou.

Jakmile je řídicí systém naprogramovaný, nastává čas na *Hardware-In-the-Loop* (HIL) etapu vývoje. HIL je forma simulace v reálném čase, která se

odlišuje přidáním reálných prvků do řídicí smyčky. Těmito prvky mohou být samotný řídicí systém nebo reálný řízený systém. Velmi často používaná konfigurace v průmyslu je, že *plant* model (prostředí, stejné jako v RCP fázi) je simulován a řídicí systém je reálný.

Posledním krokem „V“ cyklu je kalibrace. Je to proces optimalizace a ladění reálného řídicího algoritmu za účelem dosažení požadované odezvy systému podle technického zadání. Kalibrační přípravky jsou kombinací hardwarového rozhraní a softwarové aplikace, která umožňuje přístup a změny kalibračních proměnných v řídicím systému. Typické části, které vyžadují kalibraci, jsou různé *look-up* tabulky, násobící koeficienty, konstanty, atd. Struktura řídicích algoritmů zůstává během kalibračního procesu nezměněna.

Výhody nastíněného vývojového procesu jsou především:

- jednotné vývojové prostředí pro všechny skupiny vývojářů a všechny fáze vývoje aplikace či prototypu,
- rychlá reakce na změny požadavků a parametrů aplikace,
- průběžné testování, opravy chyb a optimalizace modelu během celého vývojového cyklu,
- automatické generování kódu pro cílovou platformu, snadný vývoj testovacích procedur,
- a v neposlední řadě i automatické generování dokumentace pro certifikační fázi vývoje. Komerčně dostupné softwarové a hardwarové vybavení, např. MATLAB se systémem dSPACE, splňuje parametry podle norem RTCA DO-178, 254 a je proto výhodné pro vývoj kritických aplikací v leteckém průmyslu.

Jeden z dílčích cílů doktorské disertační práce je praktické ověření metody *Model Based Design* při vývoji kritických aplikací v leteckém průmyslu a posouzení její vhodnosti. Přestože v oblastech automobilového průmyslu je tato metoda hojně používána, v letectví si ještě své plné nasazení stále hledá.

Následující odstavce popisují současný stav poznání v oboru řízení elektrických pohonů, především však řízení elektronicky komutovaných motorů.

4.2 Přístup k řešení disertační práce

Osnova řešení zahrnuje následující body:

- definice kritických aplikací, moderní trendy v oblasti letecké techniky, požadavky na leteckou techniku,
- popis postup vývoje mechatronických soustav a moderních trendů vývojového cyklu, založených na simulačním modelování technických soustav,
- studium a shrnutí současného stavu v oblasti senzorového a bezsenzorového řízení EC motorů při různých rychlostech otáčení,
- posouzení a experimentální ověření jednotlivých možností řešení, porovnání náročnosti jednotlivých metod, kritické vyhodnocení nejvíce použitelných metod řešení,
- experimentální ověření nejvhodnějších metod řízení na funkčních vzorcích elektroniky s příslušným motorem,
- návrh vlastní koncepce řešení, která bude splňovat vytyčené cíle,
- návrh funkčních vzorků jednotlivých hardwarových i softwarových modulů řídicího systému,
- výroba, osazení, oživení a ověření funkčnosti jednotlivých modulů řídicího systému a výkonové elektroniky
- modelování elektronicky komutovaného motoru na PC, modelování řízení a výkonové elektroniky
- optimalizace navrženého řešení, nastavování vnitřních regulátorů modelováním soustavy v prostředí MATLAB/Simulink
- experimentální testování na měřícím *standu* – spolupráce s externí společností, analýza momentové charakteristiky pohonu.

5 Dosažené výsledky

Tato kapitola popisuje stav řešení problému, který byl od počátku doktorského studia proveden. Postup prací je v souladu s navrženými body uvedenými v předchozí kapitole a odpovídá doporučené metodice vývojového cyklu kritických aplikací v letectví. Mezi první body cyklu patří návrh laboratorního/funkčního vzorku řídicí a výkonové elektroniky a modelování EC motoru s řízením v prostředí MATLAB/Simulink.

Po ověření funkce prvotního funkčního vzorku a základních metod řízení byl navržen prototyp elektroniky a jsou zvoleny vhodné algoritmy řízení. Prototyp řídicí elektroniky již umožňuje efektivní zapojení metody *Model Based Design* a simulační modelování v prostředí MATLAB/Simulink a dSPACE pro *Hardware in the Loop*.

V poslední fázi vývoje je připraven sériový výrobek podle předepsané technické specifikace. Následují poslední kroky v nastíněných vývojových cyklech, tzn. optimalizace vnitřních regulačních obvodů a nastavení požadované dynamiky celého systému.

Během vývoje jsou používány efektivní algoritmy, které snižují výpočetní náročnost metod řízení. Mezi ně patří např. implementace diskrétního PID regulátoru při použití Z transformace (usnadnění výpočtu regulačního zásahu), číslicová FIR (filtr s konečnou impulzní odezvou) filtrace indukovaných napětí motoru, optimalizační metody a toolboxy MATLABu pro ladění regulátorů, atd.

5.1 Požadavky na HW navrhovaného pohonu

Na počátku vlastního řešení elektrického servopohonu pro kritické aplikace bylo definování základních požadavků na HW tohoto zařízení. Požadavky lze rozdělit do dvou kategorií – požadavky na rozhraní (řízení z nadřazeného systému, napájení) a na fyzikální vlastnosti (výkon, dynamika, atd.).

Základní požadavky na rozhraní a integraci do systémů jsou následující:

- servopohon bude řízen prostřednictvím digitální komunikační sběrnice (CAN nebo RS-232) nebo analogovými vstupními signály,

- jednotka včetně BLDC motoru bude napájena z DC sběrnice palubní sítě s maximální hodnotou napětí 35 V s možností záložního napájení z baterií,
- řídicí jednotka bude schopna přijímat START/STOP příkazy a požadavek na hodnotu otáček a směr otáčení,
- řídicí jednotka bude schopna indikovat základní provozní vlastnosti – odebíraný proud, napětí napájecí sběrnice, vnitřní stav řídicí jednotky, vnitřní testy ochrany, testy po zapnutí, atd., s využitím digitální komunikační sběrnice, resp. diskretních digitálních výstupů

Mezi základní fyzikální vlastnosti patří:

- odebíraný příkon nepřesáhne 500 W špičkově, trvalý příkon bude cca. 250 W,
- důraz je kladen i na minimální zástavbové rozměry,
- provozní teplota jednotky se pohybuje od -55°C do 85°C,
- další fyzikální vlastnosti jsou dány zkouškami podle normy DO-160 (odolnost proti elektromagnetickému záření, vibracím, vlhkosti, přechodovým jevům v napájení, apod.).

Součástí zadání bývá i předepsaná spolehlivost elektroniky na výskyt poruch na 1 letovou hodinu. Tato hodnota je určena podle kritičnosti celého zařízení. Různé kategorie již byly uvedeny výše.

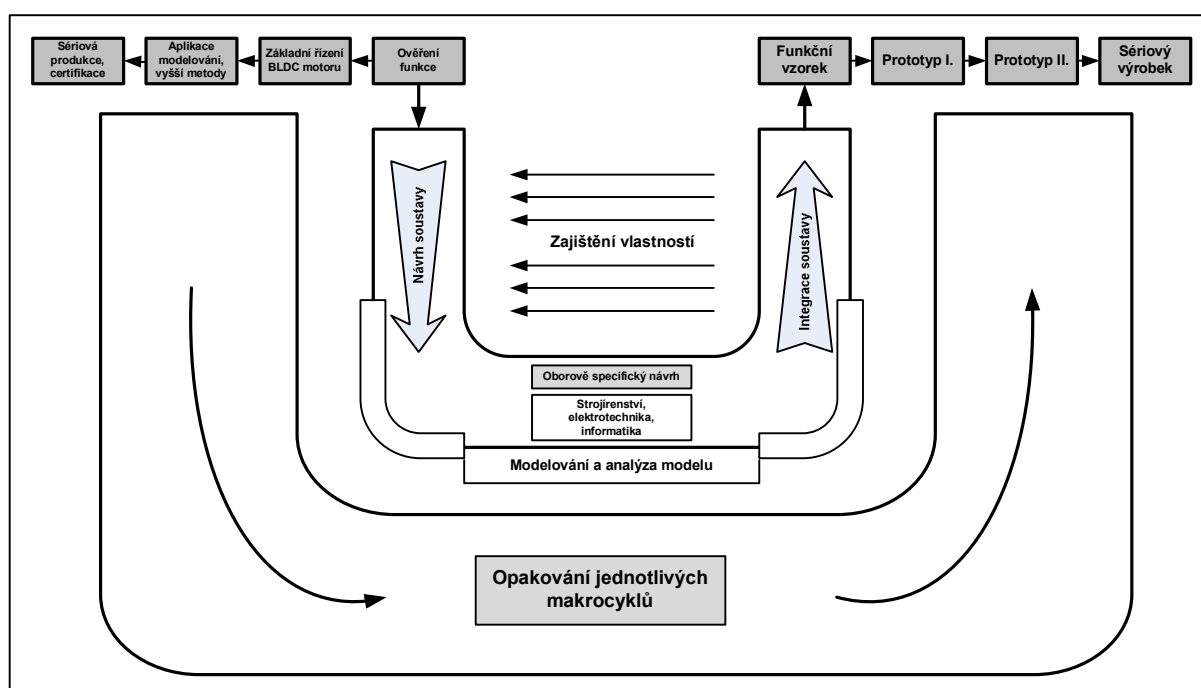
Výsledná spolehlivost je součástí analýzy spolehlivosti, která je označována pod zkratkou FMEA, příp. FMECA. Český překlad této zkratky může být „Analýza způsobů a důsledků poruchových stavů“ a je nezbytná pro celkové prokázání bezpečnosti celého systému. Zároveň dává užitečné informace během vývoje elektroniky a označuje tak nejslabší místa systému, kterým je potřeba věnovat zvýšenou pozornost. V kap. 5 je uvedena ukázka výsledků takové analýzy pro řídicí jednotku palivového čerpadla, která byla vypočítána ve spolupráci se specializovanými laboratořemi. Získání těchto relevantních výsledků spolehlivosti elektronických součástek je velmi složité. Většina společností si tyto výsledky obstarává sama (dlouholeté zkušenosti a měření) a následně pečlivě chrání. Lze však i nalézt ucelené databáze a přehledy, jejichž poskytování je většinou předmětem podnikání. Cena těchto informací je potom velmi vysoká.

5.2 Řídicí a výkonová elektronika

Podstatnou částí elektrického servopohonu, jak bylo uvedeno výše, je moderní řídicí a výkonová elektronika. Je nedílnou součástí pohonu a podílí se velkou měrou na celkových dynamických parametrech. V rámci řešení disertační práce byly vyvinuty funkční vzorky a prototypy pro ověření základních vlastností EC motoru a jednoduchých forem senzorového řízení. Firmware mikroprocesoru řídicího modulu koresponduje s algoritmy ověřenými v prostředí MATLAB/Simulink a dSPACE, které jsou rovněž dále popsány.

Ve spolupráci s externí společností byly vyvinuty a osazeny desky plošných spojů řídicí a výkonové elektroniky, které jsou dále detailně popsány. Po oživení a naprogramování byly ověřeny některé způsoby řízení na testovacím měřicím standu s mechanickou a elektrickou brzdou. Zkoušenými motory byly běžně prodávané typy od firem Maxon a Anaheim Automation. Na základě naměřených hodnot a zjištěného chování elektroniky jsou jednotlivé moduly neustále zlepšovány.

5.2.1 Vývoj HW z pohledu násobného makrocyclu



Obr. 13 Vývoj HW s pohledu mnohonásobného makrocyclu.

Na Obr. 13 je uveden vývoj HW z pohledu několikanásobného makrocyklu, který byl teoreticky vysvětlen v kapitole 4.1.2. Vývoj je většinou rozdělen na více fází. Funkční vzorek slouží k ověření základních funkcí, jako je např. princip řízení elektronicky komutovaného motoru. Dále vývojové práce pokračují přes fázi prototypovou. V této části jsou vymezeny rozměry zařízení, upraveny podle klimatických a provozních požadavků. Elektronika je blíže přizpůsobena technické specifikaci zákazníka. Tato fáze také většinou obsahuje předběžné výpočty spolehlivostní analýzy FMEA/FMECA a předběžných certifikačních zkoušek v externích laboratořích.

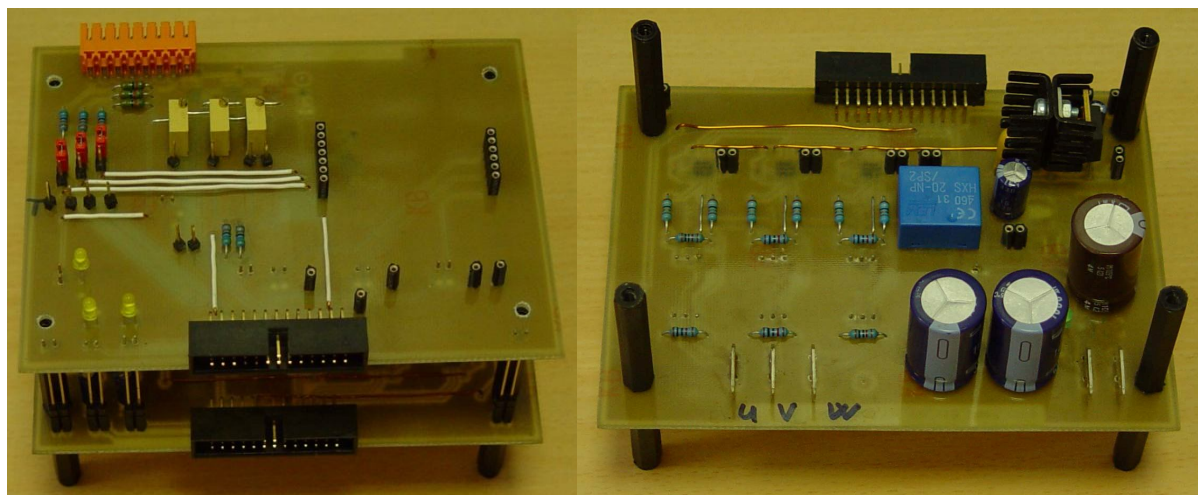
Na základě předběžných analýz a testů je proveden redesign elektroniky včetně úpravy desky plošných spojů. Tato část se většinou opakuje více než jednou a znatelně zvyšuje celkové náklady vývoje. Je zřejmé, že schvalovací proces s následnou certifikací u příslušných leteckých úřadů není možný, dokud zařízení dokonale nesplňuje všechny požadované parametry a vlastnosti předepsané v příslušných technických normách.

Poslední fáze, ve které se vývojové práce překlápí do sériové produkce, je rovněž finančně a časově náročná část projektu. V závislosti na složitosti vyráběného zařízení je nutné zajistit kvalitní reprodukovatelnou výrobu, tzn. vznikají výrobní testery, přípravky, výrobní dokumentace, atd..

5.2.2 Funkční vzorek výkonové elektroniky

Funkční vzorek výkonové elektroniky, uvedený na Obr. 14, umožňuje ověření základních metod řízení EC motoru, jako je frekvenční řízení s použitím 3 Hallových snímačů pro polohovou zpětnou vazbu. Maximální dodávaný proud do motoru je z důvodu ne příliš kvalitního zpracování plošného spoje omezen na maximálně 5 A. Odebíraný proud ze stejnosměrného meziobvodu je možné měřit analogovým snímačem proudu (modrá kostka na Obr. 14). Schéma zapojení výkonové elektroniky je v příloze A.

Analogový signál z tohoto snímače je nutné převést do digitální podoby analogově-digitálním převodníkem a následně zpracovat v řídicí procesorové jednotce. Výkonová deska navíc obsahuje jednoduchou nadproudovou ochranu. Při překročení nastaveného limitu proudu jsou uměle blokovány výkonové budiče spínacích tranzistorů MOSFET nezávisle na řídicí jednotce. Tato ochrana je velmi spolehlivá, rychlá a nezávislá na řídicím algoritmu.



Obr. 14 Funkční vzorek výkonové elektroniky.

Řídicí jednotka, která byla v této fázi implementována na pokusném plošném spoji, se připojuje přes konektorové rozhraní 28-pinů na boku. Konektor obsahuje vstupní signály jednotlivých PWM kanálů plného spínacího mostu, tvořeného tranzistory MOSFET s odporem v sepnutém stavu řádově desítky miliohmů. Nekvalitní uspořádání a propojení řídicí a výkonové jednotky vedlo k přeslechům při rychlém spínání výkonových prvků a k nestabilní funkci, která může vést až k poškození polovodičových prvků.

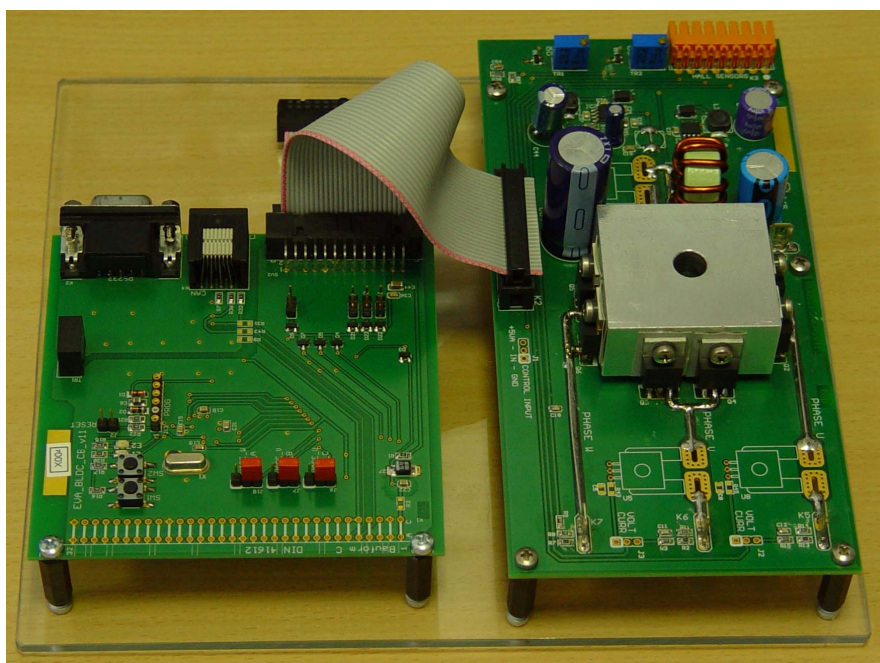
Funkční vzorek neumožňuje implementaci složitějších řídicích algoritmů, neumožňuje měření indukovaných napětí při otáčení motoru, neobsahuje dostatek ochranných obvodů výkonové části apod. Rovněž je obtížné opatřit spínací prvky kvalitním chladičem s dostatečným odváděním tepla. Mechanické uspořádání bylo voleno pouze z důvodu jednoduché konstrukce desky plošných spojů, která mohla být vyrobena svépomocí. Pro výrobu byly rovněž použity elektronické komponenty s nižšími fyzikálními pracovními rozsahy, než jsou potřeba pro řízení v kritických aplikacích.

Funkční vzorek tedy sloužil pouze pro rychlé ověření základních vlastností EC motorů a specializovaných motorových DSP procesorů. Není proto ani přizpůsobený pro použití modelování a H-I-L simulování v prostředí dSPACE. Pro tento způsob vývoje je nutné opatřit řídicí a výkonovou jednotku dodatečnými vstupy a výstupy, které úrovnově odpovídají zkušebnímu HW dSPACE simulátoru.

Prototypy řídicí a výkonové jednotky, které jsou v dalším kroku nastíněného vývojového cyklu, již umožňují komplexnější způsoby užívání. Během řešení disertační práce vznikly 2 prototypy navzájem odlišné.

5.2.3 Prototyp I. řídicí a výkonové elektroniky

Prototyp č. I řídicí a výkonové elektroniky je uveden na Obr. 15. Z obrázku je patrné, že desky plošných spojů jsou realizovány jako douvrstvé s nepájivou maskou a potiskem. Obě desky jsou rovněž spojeny flexi-kabelem s 28 vodiči. Modulární řešení obou desek je voleno z důvodu snadné změny libovolné části servopohonu a snadného měření zvoleného signálu. Prostorová optimalizace není ještě v této fázi vývoje uvažována. Schéma zapojení výkonové a řídicí elektroniky je v příloze B.



Obr. 15 Prototyp řídicí (levá část) a výkonové (pravá část) elektroniky.

Řídicí elektronika

Tato část je tvořena 16-bitovým signálovým procesorem dsPIC30F4011 [19], který je uzpůsoben pro pohonářské aplikace. To většinou znamená, že obsahuje 4 nezávislé kanály pulsně-šířkové modulace (PWM), které jsou vhodně navázány na interní obvody procesoru. Mikroprocesor např. umožňuje synchronizaci vzorkování analogových vstupů na střed generovaného PWM signálu, což umožňuje snadné měření špičkových motorových proudů v jednotlivých fázích. Aritmeticko-logická jednotka je dále uzpůsobena na rychlé

výpočtu součtu a součinu, což je opět výhodné pro rychlé počítání regulačních zásahů proudového a otáčkového regulátoru.

Každý moderní servopohon musí obsahovat i standardní digitální komunikační rozhraní pro řízení z nadřazených systémů. Tato jednotka obsahuje CAN a RS-232 rozhraní.

Programování mikroprocesoru v aplikaci bez nutnosti jeho fyzického vyjímání je dnes rovněž základním předpokladem. Pro tyto účely lze opatřit procesor příslušným bootloaderem nebo využít jeho ISP rozhraní.

Výkonová jednotka

Podobně jako u funkčního vzorku, je výkonová elektronika většinou tvořena spínacími prvky z tranzistorů MOSFET a okolních obvodů, zajišťujících jejich rychlý přechod mezi stavy zapnuto/vypnuto. Tyto obvody jsou označovány jako budiče výkonových tranzistorů a jsou schopné dodat proud až 1,5 A pro rychlé nabití vstupní kapacity hradla („gate“ svorky) tranzistoru. Tyto obvody zásadně ovlivňují spínací ztráty celého spínacího mostu a musí být proto kvalitně vyřešeny. Na desce je i místo pro umístění adekvátního chladiče k dodávanému výkonu.

Oboustranný návrh desky umožňuje lepší výkonovou optimalizaci jednotlivých napájecích cest, proto je jednotka schopná do připojeného motoru dodávat proud až 10 A. K dispozici jsou rovněž snímače proudu v každé fázi a jeden snímač v hlavní napájecí cestě. Ochranné obvody reagují na přetížení elektroniky nadproudem, vysokou teplotou nebo příliš vysokým napětím na hlavní napájecí větvi vyvoláním přerušení na procesoru řídicí elektroniky.

Možnosti prototypu I.

Oproti funkčnímu vzorku umožňuje kombinace řídicí a výkonové elektroniky prototypu rozmanitější způsoby řízení. Na prototypu bylo vyzkoušeno senzorové řízení, sinusové řízení s polohovou zpětnou vazbou a jednoduché metody bezsenzorového řízení. Výkonová deska ale neumožňuje lepší filtrování fázových indukovaných napětí.

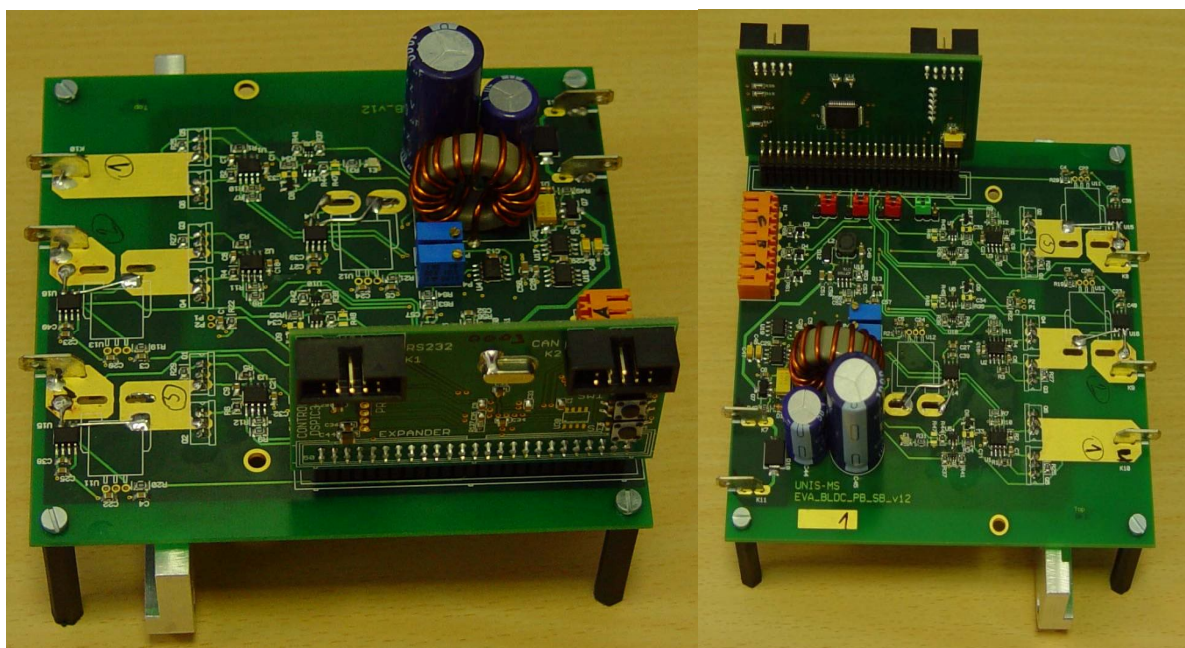
Deska je dále osazená konektory pro komunikaci s osobním počítačem, pro který byl vytvořen přehledný SW, kterým lze pohon ovládat. Grafické uživatelské prostředí a jeho možnosti jsou uvedeny v následujících kapitolách. Komunikace s nadřazeným PC umožňuje sledování jednotlivých parametrů během provozu a ladění regulačních smyček.

Prototyp I. již dovoluje použití metod *Model Based Design*, tzn. lze simulovat řídicí algoritmy v prostředí MATLAB/Simulink a generovat cílový kód pro procesor 30F4011. Rovněž výkonovou elektroniku lze připojit k HW vybavení dSPACE a používat metody *Hardware-in-the-Loop*, které jsou také dále popsány.

Byla provedena další úprava řídicí i výkonové elektroniky, především z důvodu vyzkoušení dalších metod řízení a zvýšení autonomnosti pohonu. Prototyp II. byl také konstruován s ohledem na spolehlivost jednotlivých komponentů a požadavky environmentálních zkoušek předepsaných normou DO-160 [5].

5.2.4 Prototyp II. řídicí a výkonové elektroniky

Prototyp II., uvedený na Obr. 16, je opět složen modulárně z řídicí (malá deska kolmo k hlavní desce) a výkonové elektroniky. Během řešení disertace nevznikl žádný sériový výrobek a uvedená elektronika je poslední část vývojového cyklu. Proto budou jednotlivé vlastnosti více popsány. Schéma zapojení řídicí a výkonové desky jsou v příloze 0.



Obr. 16 Prototyp řídicí (menší deska) a výkonové elektroniky.

Řídicí elektronika

Řídicí elektronika elektrického pohonu je opět tvořena signálovým procesorem (DSP) firmy Microchip [19], typ dsPIC30F6015. Z důvodu optimalizace signálových tras, především strmých čel a pat obdélníkových pulsů PWM kanálů, je DPS

připojena přes 50-pinový hřebenový konektor přímo k výkonové desce v blízkosti budičů spínacích tranzistorů. Krátká vzdálenost analogových signálů k vnitřnímu AD převodníku procesoru je rovněž důležitá. Omezí se tím nežádoucí rušivá napětí indukovaná do kabelů a omezí se i vlastní vyzařování při rychlém spínání. Elektronika je tak více odolná a snáze vyhoví náročným zkouškám elektromagnetické kompatibility, kterými musí každý výrobek před uvedením do prodeje projít.

Podobně jako u prototypu I. je jednotka opatřena digitálními komunikačními rozhraními CAN, RS-232 příp. RS-485, která jsou často používaná při řízení z nadřazeného systému.

Uvedený mikroprocesor disponuje čtyřmi nezávislými PWM kanály, které jsou všechny výkonovou elektronikou využity. 3 kanály slouží pro řízení celého spínacího mostu, 4. kanál je pro aktivní brzdu ve stejnosměrném meziobvodu. Aktivní brzdění pohonu při decelaci má pozitivní vliv na dynamiku systému a pro některé aplikace, např. rychlé zastavení palivového čerpadla, je velmi důležité. Deska dále obsahuje rychlou FRAM paměť, která slouží pro uložení kalibračních dat, vnitřních nastavení procesoru, komunikace, regulátorů, AD převodníku, atd.

Další parametry mikroprocesoru lze shrnout do následujících bodů:

- 144 kB FLASH programová paměť, 8 kB datová paměť a 4 kB paměť typu EEPROM pro data programu,
- 30 MIPS výpočetní rychlost při 118 MHz,
- DSP instrukce pro rychlé aritmetické operace (regulátory, filtrace, měření),
- 8 PWM výstupních kanálů (4 nezávislé generátory) pro řízení motorů s nastavitelným *dead time*, synchronizace s A/D převodem,
- CAN, UART, 16 kanálů pro A/D převod, 5 vnitřních čítačů, kvadrurní enkodér (polohová zpětná vazba), atd..

Architektura procesoru je optimalizovaná pro programování v jazyce C. Při vývoji bylo použité vývojové prostředí MPLAB firmy Microchip a překladač C30. Oba softwarové produkty jsou do určité velikosti kódu a pro výukové účely nabízeny zdarma.

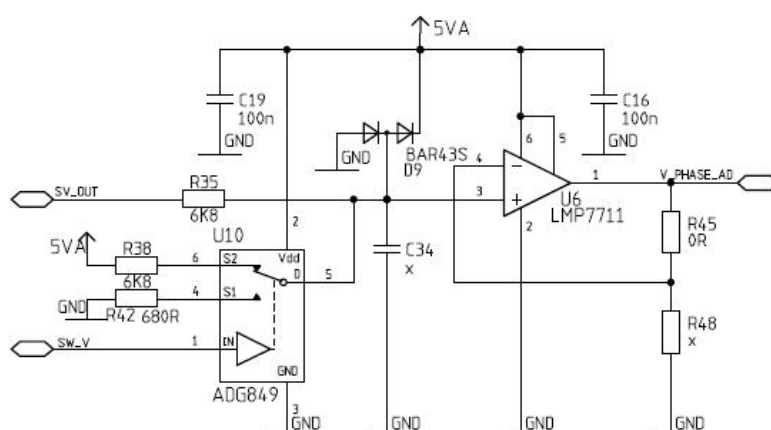
Výkonová elektronika

Výkonová elektronika s přílehlými analogovými obvody tvoří zbylou část elektrického servopohonu. Mimo plného spínacího mostu ze šesti MOSFET tranzistorů s příslušnými budiči je dále tvořena snímači proudu jednotlivých fází, nadproudovou a přepětovou ochranou, přepínacími a komparačními obvody pro bezsenzorový režim, obvody brzdy a napájecími zdroji.

Parametry výkonové části lze shrnout do následujících bodů:

- šestice MOSFET tranzistorů FDP050N – 60 V, 80 A, 5 mΩ (odpor v sepnutém stavu) s budiči HIP2101 pro snížení spínacích ztrát,
- tři Hallovy snímače proudu do 30 A pro skalární a vektorové metody řízení,
- nízkošumové operační zesilovače s nastavitelným vstupem pro snímání indukovaného BEMF napětí při bezsenzorové řízení, viz. Obr. 17,
- snímač teploty s rozsahem do 150°C pro spínací tranzistory – tepelná ochrana,
- ochrana před nadproudem a vysokým napětím na stejnosměrné větvi s rychlými komparátory,
- obvody pro zpracování signálu z Hallových snímačů polohy – senzorové řízení.

Napájecí zdroje jsou tvořeny několika spínanými DC/DC (step-down) měniči pro napájení digitálních i analogových obvodů.



Obr. 17 Vstupní část pro měření BEMF napětí.

Tyto měniče mají účinnost přes 90% při napájení ze stejnosměrné sítě 28V a lze tak opět snížit celkovou výkonovou ztrátu jednotky. Napěťové reference pro AD převodník a nízkošumové operační zesilovače jsou zajištěny lineárním zdrojem napětí. Na Obr. 17 je netradičně řešená analogová vstupní část pro měření indukovaných napětí motoru. Každé fázi přísluší samostatný vstupní blok, jehož zapojení je identické s Obr. 17. Vstupní napětí lze podle rychlosti otáčení motoru zesílit nízkošumovým operačním zesilovačem (zisk je nastaven rezistory ve zpětné vazbě) nebo naopak vstupním odporovým děličem zmenšit. V prvním případě, tj. nízká rychlost otáčení, dochází k posunutí vstupního napětí do kladných hodnot. Vstup je přepínán elektricky ovládaným analogovým přepínačem z řídicího mikroprocesoru.

Výkonová elektronika dále obsahuje standardní řešení elektronických obvodů, které lze najít ve většině průmyslových řídicích jednotek. Důraz je pouze kladen na teplotní a výkonové parametry součástek, které musí splňovat definované pracovní oblasti zařízení kritických aplikací v letectví. Tzn., že většina součástek patří do kategorie „průmyslová“ nebo „vojenská“ s rozšířeným teplotním rozsahem od -55° do 125°C. Z důvodu požadované spolehlivosti a životnosti, kterou lze i vyčíslit algoritmy výpočtů FMEA/FMECA, jsou některé součástky úmyslně výkonově, resp. napěťově předimenzovány.

5.2.5 Analýza spolehlivosti FMECA

Jak již bylo uvedeno výše, analýza spolehlivosti jednotlivých komponentů systému patří mezi zásadní výpočty při prokazování spolehlivosti celého letadla. Struktura průkazu bezpečnosti se skládá z několika bodů a jeho struktura vypadá následovně:

1. Popis systému (zde je nutný detailní popis celého systému, chování jednotlivých částí a celku).
2. Ohraničení systému (často velmi složitá část, ohraničení není většinou zcela zřetelné).
3. FMEA/FMECA analýza komponentů (analýza způsobů a důsledků poruchových stavů, výsledkem bývá udání pravděpodobnosti poruchového stavu a na jednu letovou hodinu).
4. Pro vytipované stavy FTA nebo RBD analýza (FTA – stromy poruchových stavů, RBD – blokové diagramy bezporuchovosti, analýza se provádí jen pro některé stavy, většinou velmi složité).

5. Závěry a doporučení (popis konstrukce systému, analýza a doplnění údajů do letové příručky, předepsání pravidelné údržby na základě výsledků analýz).

Bod 4. prokazování bezpečnosti systému obsahuje složité analýzy systému na základě konstrukce stromů poruchových stavů - FTA a blokových diagramů bezporuchovosti – RBD. RDB je metoda používaná pro popis a řešení vzájemných vazeb mezi prvky systému a bývá velmi složitá z důvodu rozsáhlosti. Byla proto nahrazena metodou FTA, která se stává přehlednější.

Metoda stromu poruchových stavů je deduktivní metoda, která svojí povahou patří mezi orientované grafy. Cílem je určit pravděpodobnost nastoupení vrcholové události.

Většina těchto analýz je prováděna nezávislými institucemi, které se na podobné výpočty specializují. Vývojový tým jednotlivých zařízení tak musí splnit první body průkazu, tj. dokonalý popis celého zařízení, jeho funkčních stavů (pro případ FMECA analýzy) a z nich vyplývajících chování systému při selhání. Pro výpočty a konstrukci tabulek a grafů jsou většinou používány specializované programy. Více informací je uvedeno např. v [23]

FMECA analýza řídicí jednotky čerpadla

Tato část kapitoly dále uvádí příklad výsledků analýzy spolehlivosti - FMECA, která byla počítána externím pracovištěm. Analýza se týká elektroniky palivového čerpadla, která obsahuje řídicí a výkonovou elektroniku elektronicky komutovaného motoru uvedenou v kap. 5.2.4. Cílem analýzy bylo nalézt nejvíce kritické části zapojení a kritické součástky, jejichž selhání může způsobit nefunkčnost celého čerpadla.

V rámci řešení disertační práce byly připraveny vstupní data pro spolehlivostní FMECA analýzu, která byla počítána externím pracovištěm. Jednotlivé části ze schématu zapojení byly rozdělané do bloků a detailně popsány v rámci celého zařízení. Pro každou součástku bylo dále uvažováno, zda a jaký vliv má na provoz zařízení v případě její nefunkčnosti. Jednotlivé nežádané poruchové stavy jsou uvedeny v následujícím odstavci. Je zřejmé, že celkový popis je značně rozsáhlý, je-li průměrný počet součástek na desce plošných spojů takového zařízení kolem 500.

Provozní požadavky čerpadla byly stanoveny technickou specifikací na min. 20 000 letových hodin nebo 20 roků. Zařízení má rovněž definované různé poruchové stavy a pravděpodobnosti jejich výskytu. Pro předběžnou analýzu byly uvažovány následující hodnoty pravděpodobnosti poruchového stavu na letovou hodinu:

- | | |
|--------------------------------------------------|-----------|
| • porucha S1 – „Nevyžádaný běh na max. otáčkách“ | 10^{-6} |
| • porucha S2 – „Ztráta regulace“ | 10^{-5} |
| • porucha S3 – „Chybná indikace chyby zařízení“ | 10^{-7} |
| • porucha S4 – „Nemožnost zastavení čerpadla“ | 10^{-6} |

Tyto hodnoty byly uvažovány pro zařízení pracující v kategorii bezpečnosti B, tj. kategorie „Nebezpečné“. Vycházejí z detailní systémové analýzy celého letadla a bývají určeny výrobcem té části, ve které se vyskytují. Při výpočtu byly dále uvažovány venkovní klimatické podmínky dané normami MIL-STD-810 při jednoročním provozu.

Během předběžné FMECA analýzy bylo počítáno se zhruba 859 chybovými stavy na cca. 386 možných pozic (součástkách). Mezi chybové stavy elektronických součástek patří např. rozpojení/spojení u pasivních částí (rezistor, kondenzátor, cívka) a funkční/nefunkční u polovodičů a aktivních prvků.

Spolehlivostní analýza našla 9 možných chyb, které mohou nastat se zvýšenou pravděpodobností. Tyto chyby jsou pro funkci elektrického pohonu kritické. Součástky, které snižují výslednou bezpečnost, jsou zpravidla polovodičové diody a výkonové tranzistory. V případě zkratu se stává čerpadlo zcela nefunkční a může dojít i k výkonovému přetížení napájecí větve. Tento nedostatek lze řešit použitím diod a tranzistorů speciální kategorie, která má sníženou pravděpodobnost selhání a rozšířené provozní parametry. Takové součástky jsou většinou označovány symbolem M a jsou určené pro vojenský průmysl – *military*. Zvýšení spolehlivosti lze také udělat vícenásobným paralelním řazením kritických částí, tzv. redundancí. Dochází tak i ke snížení výkonového namáhání a k lepším výsledkům ve FMECA analýze.

Výsledkem analýzy je tedy číselné vyjádření pravděpodobnosti poruchy S1 až S4 na jednu letovou hodinu:

Tab. 2 Výsledky FMECA analýzy.

Typ poruchy	Pravděpodobnost výskytu	Požadavek
porucha S1	$1,250 \times 10^{-8}$	1×10^{-6}
porucha S2	$1,565 \times 10^{-6}$	1×10^{-5}
porucha S3	$1,500 \times 10^{-8}$	1×10^{-7}
porucha S4	$3,138 \times 10^{-8}$	1×10^{-6}

Z vypočítaných výsledků analýzy lze usuzovat, že pravděpodobnost výskytu jednotlivých poruch S1 až S4 je pro zařízení v bezpečnostní kategorii B dostačující. Jako nejvíce pravděpodobná porucha, která může nastat s pravděpodobností řádově 10^{-6} je S2 – ztráta regulace.

Dalším výsledkem FMECA analýzy je doporučení pro pasivní i aktivní součástky v rámci provozních limitních hodnot. Čím více se součástka blíží v zapojení své limitní hodnotě, tím více klesá její spolehlivost. Doporučeno je nepřekračovat 50% hranici. Používání mechanických komponentů, jako jsou konektory, mechanická relé, atd. vede opět ke značnému snížení celkové spolehlivosti. Prokázání bezpečnosti různých zákaznických obvodů – ASIC, nebo programovatelné logiky je rovněž velmi obtížné.

Tato pravidla jsou většinou protichůdná s požadavky zákazníků na konstrukční vlastnosti zařízení a snahou o dodržení co nejmenších rozměrů, hmotnosti a výsledné ceny. Je proto nezbytně nutné během vývoje průběžně analyzovat elektroniku již od etapy funkčního vzorku a zvolit tak vhodný kompromis.

Omezení a nedostatky metody FMEA/FMECA

Podle [23] , je FMEA/FMECA neobyčejně účinná metoda analýzy spolehlivosti a bezpečnosti, je-li aplikována na prvky, které mohou způsobit poruchu celého systému. Nejúčinnější období její aplikace jsou předvýrobní etapy. Metoda má však i jistá omezení aplikace a nevýhody.

FMEA/FMECA může být složitá, pracná a časově náročná v případě komplexních systémů, které mají mnoho funkcí a sestávají z mnoha komponentů nebo je-li aplikována na složitý systém poprvé. To je způsobeno

tím, že je při jejím použití nutno uvažovat velké množství podrobných informací o systému a dokonale znát konstrukci, funkci a technologii výroby a způsoby provozování a provozní podmínky. To všechno předpokládá účast týmu odborníků různých profesí na jejím vypracování. Klade tedy velké nároky i na organizaci součinnosti prací na vypracování analýzy. Tyto obtíže se mohou ještě zvětšovat, existuje-li více variant způsobů použití systému nebo strategií údržby a oprav.

Jiným omezením je skutečnost, že FMEA/FMECA nezahrnuje důsledky chyb lidského faktoru. Interakce mezi člověkem a systémem jsou předmětem různých studií, které ukazují, že u velmi složitých a nebezpečných systémů je člověk nejslabším prvkem. Proto se úloha člověka často nahrazuje rozšířením systému o automatické řídicí, bezpečnostní a softwarové prvky, které ovšem s sebou nesou i zvýšení rizika selhání i těchto prvků a celého systému a komplikují aplikaci FMEA/FMECA na takové systémy. Nicméně FMEA/FMECA může zjistit komponenty, které jsou nejcitlivější na nepříznivé vlivy činnosti člověka a naznačit kroky k eliminaci těchto nepříznivých vlivů.

Další omezení se objeví v případě, když se významně projevují vlivy provozních podmínek a prostředí. Uvážení těchto vlivů vyžaduje dokonalou znalost charakteristik, práce a reakce různých komponentů systému na tyto vlivy.

Je třeba konstatovat, že lidské chyby a vlivy prostředí na spolehlivost a bezpečnost systému jsou častým zdrojem poruch společného typu nebo poruch se společnou příčinou.

5.3 Vývoj SW řídicí jednotky

Je zcela zřejmé, že na celkové kvalitě a spolehlivosti systému se do značné míry podílí výsledný software řídicího mikroprocesoru. Z tohoto důvodu je veškerý vytvořený kód podroben zkouškám a funkčním ověření s předem definovaným postupem. V leteckém průmyslu je toto ošetřeno příslušnými normami s označením DO-178, [3], které rovněž popisují vlastnosti výsledné vývojové dokumentace pro certifikační fázi. Je odhadováno, že samotná příprava certifikačních dokumentů spolu s testováním tvoří značnou část celého vývojového procesu a v mnohých případech převyšuje časovou náročnost psaní vlastního řídicího kódu.

Při podrobnější studii softwarové směrnice DO-178 (platí i pro směrnici pro tvorbu hardwarové dokumentace DO-254) lze rovněž zjistit, že norma nedává přesný postup tvorby certifikační dokumentace. Je ponechána značná volnost, která však nemusí být vždy kladně hodnocena ze strany schvalovacích úřadů. Praxe ukazuje, že výsledná forma a obsah stěžejních dokumentů bývají nepřímo předepsány velkými výrobci letecké techniky (např. Airbus, Boeing), kteří se velkou měrou podílí na tvorbě samotných certifikačních norem. Je proto zřejmé, že pozice malých firem zabývajících se vývojem dílčích systémů letadel je značně ztížena.

Je proto snahou snížit časové a finanční náklady vývoje a přípravy vývojové dokumentace na co nejnížší hodnotu. Za tímto účelem je aplikována metoda modelování řídicích algoritmů v prostředích MATLAB/Simulink, které jsou příslušnými autoritami akceptovány jako dostatečné vývojové podklady.

V následujících kapitolách jsou porovnány metody řízení elektronicky komutovaného motoru, které byly postupně vyzkoušeny na funkčním vzorku a prototypch výkonové a řídicí elektroniky.

Bude ukázáno, že i vhodnější řídicí metody nemohou být výsledně nasazeny z důvodu značně obtížného prokázání spolehlivosti a především pro jejich výpočetní náročnost. V kritických aplikacích je tedy nutné sledovat i tyto aspekty.

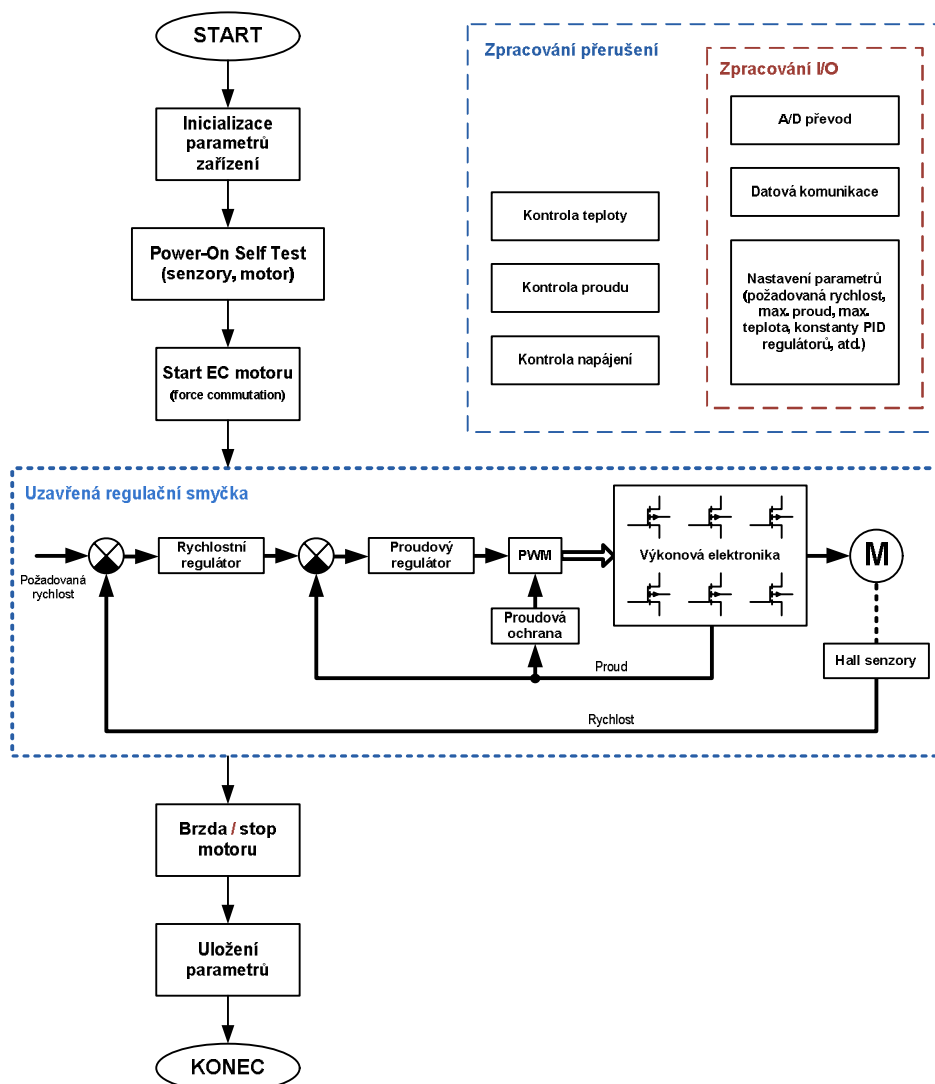
5.3.1 Požadavky řídicího software

Řídicí software má obdobné požadavky vycházející z technické specifikace, jak již bylo definováno v Kap. 5.1 u hardware. Pokud pomineme speciální požadavky servopohonu, lze pro pohon s elektronicky komutovaným motorem vytvořit obecný vývojový diagram. Tento vývojový diagram je uveden na Obr. 18.

Po připojení napájení dochází k inicializaci parametrů zařízení, tzn. vyčítání uložených dat z paměti EEPROM, která byla nastavena při výrobním procesu. Následující blok představuje vnitřní testovací procedury, které lze souhrnně označit termínem „Power-On Self Test“, známým např. z výpočetní techniky. Během tohoto testování jsou ověřeny veškeré periferie vnitřního procesoru, komunikační rozhraní, elektronické ochrany, přítomnost polohových snímačů, přítomnost motoru, atd.. Tato tzv. autodiagnostika je

dnes již hojně používána nejen v kritických aplikacích v letectví, ale i v jednodušších aplikacích v průmyslu. Jediné, v čem lze nalézt případné rozdíly je hloubka testování jednotlivých částí.

Pokud je po komunikační sběrnici přijatý příkaz pro START pohonu, následuje některá z možných startovacích sekvencí. Z mechanických a elektrických vlastností BLDC motorů není známá aktuální poloha rotoru vůči statoru při bezsenzorovém režimu činnosti. Je tedy nutné, např. z měření proudové odezvy vinutí, predikovat startovací polohu, příp. použít metodu tzv. „force commutation“, kdy je po příslušné rampě motor frekvenčně roztáčen. Tyto metody však nelze použít u kritického řízení v širokém rozmezí otáček, proto jsou většinou používány snímače polohy.



Obr. 18 Blokový diagram řídicího software.

Po startovací fázi, většinou po překročení nastaveného počtu otáček, přechází řízení na uzavřenou rychlostní smyčku, s podřízenou proudovou smyčkou. Zpětná vazba rychlostního regulátoru je tvořena snímačem polohy, u proudového regulátoru proudovým snímačem ve stejnosměrné napájecí větvi. Nastavení regulátorů udává dynamiku celého systému, proto je důležité jejich optimální vyladění. Z teorie řízení je známá celá řada postupů a metod, které ale vyžadují detailní matematický popis řízeného systému. Tento popis je většinou z důvodu přílišné složitosti systému nemožné vytvořit. Lze však empirickými metodami s následným modelováním řízený systém částečně identifikovat. V následujících kapitolách je popsána metoda optimalizace regulačních struktur, založená na metodě Model Based Design. Lze tak s výhodou použít některý z připravených toolboxů prostředí MATLAB/Simulink.

Pokud je přijatý příkaz pro zastavení, resp. snížení aktuálních otáček motoru, je aktivována elektronická brzda, která může být aktivní nebo pasivní. V případě aktivního brzdění je motor urychlován v protisměru jeho rotace. Tento způsob vyžaduje opět precizní řízení z důvodu přílišného proudového odběru takto brzděného motoru. Při pasivním brzdění jsou spínány spodní výkonové tranzistory spínacího mostu. Zde je rovněž nutné kontrolovat maximální povolený proud spínacími prvky a jejich výkonovou ztrátu.

Na pozadí neustále probíhá komunikace s nadřazeným systémem prostřednictvím digitální sběrnice nebo analogových řídicích smyček. Jsou také neustále vyhodnocovány stavy elektronických ochran, informací z A/D převodníků, atd. Tyto děje jsou většinou periodicky volány a obsluhovány formou vnitřních přerušení procesoru. Je zřejmé, že s rostoucím požadavkem na funkčnost elektrického servopohonu, roste i potřeba výpočetně výkonnějšího řídicího procesoru. Proto jsou již dnes běžně osazovány 16 bitové procesory s upravenou instrukční sadou pro rychlé výpočty, označované jako signálové procesory – DSP. Jejich taktovací frekvence přesahuje 100 MHz a výpočetní výkon několik desítek milionů instrukcí za sekundu.

V následující kapitole jsou porovnány různé metody řízení a jejich výpočetní náročnost.

5.3.2 Přehled různých řídicích metod

V této kapitole jsou přehledně uvedeny a porovnány jednotlivé řídicí algoritmy, které byly během řešení disertační práce vyzkoušeny. Jednodušší metody řízení byly zkoušeny již na elektronice funkčního vzorku, náročnější až v poslední verzi prototypu. Níže uvedená Tab. 3 vznikla měřením výpočetní náročnosti jednotlivých řídicích algoritmů během funkčního zkoušení.

Nejvhodnější algoritmus, tj. kompromis mezi výpočetní náročností, velikostí kódu a spolehlivou funkcí, byl následně použit ve finálním výrobku palivového čerpadla s širokým rozsahem provozních otáček.

Výše uvedená tabulka porovnává asi 7 různých způsobů řízení elektronicky komutovaného motoru od nejjednodušších po nejsložitější. Jsou uvedeny i požadavky na externí snímače, snímače polohy, atp. Poslední sloupce uvádí výpočetní náročnost při použití modelových řad mikroprocesoru fy Microchip.

Tab. 3 Porovnání výpočetní náročnosti řídicích algoritmů.

Typ řídicího algoritmu	Výpočtová náročnost algoritmu	Relativní cena realizace	Potřebné snímače pro řízení	Výkonnost 8-bit MCU [MIPS]	Výkonnost 16-bit DSP [MIPS]
Trapez. řízení s Hallovyými snímači	nízká	nízká - střední	Hall, IRC, atd.	1,5 - 2	1
Sinusové řízení s Hallovyými snímači	střední	nízká - střední	Hall, IRC, atd.	5	2
Bezsenzorové řízení I.	vysoká	střední	Back EMF – ext. komparátory	6	2
Bezsenzorové řízení II.	vysoká	nízká	Back EMF – AD převodníky	8 - 9	3 - 5
Vektorové řízení – senzorové	velmi vysoká	vysoká	Přesné snímače polohy, proudu	-	9
Vektorové řízení – bezsenzorové	velmi vysoká	vysoká	Přesné snímače proudu	-	25
Přímé řízení momentu	velmi vysoká	Vysoká	Přesné snímače polohy, proudu	-	30

Z tabulky vyplývá, že pro nejvíce náročné metody, tedy pro přímé řízení momentu a vektorové bezsenzorové řízení, je již potřeba velmi výkonný signálový procesor a poměrně drahé a přesné snímače proudu a polohy rotoru motoru. Tyto metody se většinou pro svoji náročnost a nedostatečnou provozní stabilitu v řízení kritických aplikací nepoužívají.

Během funkčního testování řídicích algoritmů byly vyzkoušeny následující mikroprocesory fy Microchip. Jde o rodinu procesoru od nejjednodušších PIC16 po nejvýkonnější řadu dsPIC. Některé řídicí algoritmy jsou přiloženy ve formě zdrojového kódu.

PIC16

Je 8 bitový mikroprocesor, který obsahuje nadstandardní periferie pro řízení motorových aplikací. Výpočetní výkon této nejnižší řady dosahuje do 5 MIPS (milionů instrukcí za sekundu). Oblastí jeho použití jsou především v jednoduché a nenáročné aplikaci, jako je např. řízení konstantních otáček ventilátorů aktivních chladičů nebo jednoduché metody řízení stejnosměrných motorů. Výhodou této kategorie mikroprocesorů je jejich miniaturní velikost, tj. i 6 vývodová SMD pouzdra. Tab. 3 uvádí, které metody řízení jsou na této platformě použitelné.

PIC18

Tato řada mikroprocesorů je rovněž 8 bitová. V porovnání s PIC16 řadou dále obsahují zlepšené vlastnosti periferních obvodů pro motorové aplikace. Výpočetní rychlost je zvýšena až na 10 MIPS a obsahují hardwarovou násobičku pro rychlé regulační zásahy. Tyto mikroprocesory již umožňují řízení plného spínacího třífázového můstku. Jejich nevýhodou je jednoduchý přerušovací systém znemožňující snadné řízení událostí.

dsPIC

Nejvhodnější řada 16 bitových signálových mikroprocesorů pro motorové aplikace. Firmou Microchip jsou dodávány na trh řady dsPIC30 a dsPIC33, které dosahují výpočetního výkonu až 30 MIPS. DSP jádro obsahuje hardwarovou podporu rychlého násobení a sečítání, které je důležité při výpočtu regulačních zásahů, snímání a filtraci signálů z A/D převodníků, generování signálu pulsně šířkové modulace, atd.. Tyto mikroprocesory jsou vyráběny v širokém rozsahu SMD pouzder, počtu vstupů, výstupů, atd.

Na základě získaných zkušeností z funkčních vzorků a prototypů byly pro splnění cílů disertační práce zvoleny obvody dsPIC30F6015, které jsou plně dostatečné pro zvolenou metodu řízení, komunikační schopnosti s nadřazeným systémem, atd.

5.3.3 Vhodná metoda řízení kritických aplikací

Při volbě vhodné metody řízení bylo vycházeno především z požadavků technické specifikace výsledného servopohonu s elektronicky komutovaným motorem. V rámci řešení disertační práce směřoval vývoj k řešení vhodných metod pro řízení palivového čerpadla s proměnlivou rychlostí otáčení v závislosti na požadavku aktuální dodávky paliva. Je tedy nutné zvolit metodu, při které lze spolehlivě měnit otáčky v rozmezí 300 min^{-1} až 7000 min^{-1} . Dalšími požadavky jsou schopnost rychlé změny otáček (řádově milisekundy), spolehlivý start z nulových otáček a rychlé zastavení z otáček maximálních.

Z důvodu velkého rozsahu pracovních otáček a poměrně rychlé dynamiky není efektivní používat motor v bezsenzorovém režimu. Vzhledem k malé hodnotě elektrické konstanty motoru bude indukované napětí na volném vinutí nedostatečné pro kvalitní určení aktuální polohy. Dále se ukázalo jako vhodné napájet motor při nízkých otáčkách do všech 3 fází, tudíž by snímání BEMF ani nebylo možné. Motor je tedy nutné osadit polohovým snímačem, např. trojicí Hallových snímačů. Je tím i zvýšena spolehlivost jeho rozběhu.

Při požadavku provozu v nízkých otáčkách nemá momentová charakteristika hladký průběh, což působí rušivě a projevuje se překmitáváním motoru kolem rovnovážných stavů. To je způsobeno přílišným přitahováním magnetů rotoru k pólům statoru. Je tedy nutné navíc kombinovat více druhů řízení a vhodně je mezi sebou přepínat.

Jako optimální řešení se pro otáčky do 1500 min^{-1} ukazuje sinusové řízení, kdy jsou harmonicky napájena všechna tři vinutí motoru s posunem 120° mezi jednotlivými fázemi. Po každé mechanické otáčce jsou tyto sinusové průběhy synchronizovány s polohou Hallových snímačů, což se pozitivně projevuje na snížení spotřeby a vyhlazení pohybu rotoru. Tato metoda je s výhodami použitelná pro otáčky do 1000 min^{-1} . Výpočetní náročnost (vytížení procesoru) roste se vzrůstajícími otáčkami, kdy se nutné stále rychleji generovat sinusové průběhy proudů jednotlivých fází.

Při dalším zvyšování otáček jsou pulzace momentu vyhlazeny setrvačností rotoru a řízení může přejít na jednoduché napájení dvou příslušných fází.

V následujících kapitolách je popsáno modelování EC motoru a řídicího algoritmu. Metodou identifikace je dále popsán řízený systém, z jehož výsledků jsou pomocí MATLAB toolboxů optimalizovány vnitřní regulátory. Jsou použity metody „*Hardware-in-the-Loop*“ s externím zařízením dSPACE pro simulaci modelu v reálném čase pro ověření výsledků a kvality modelu.

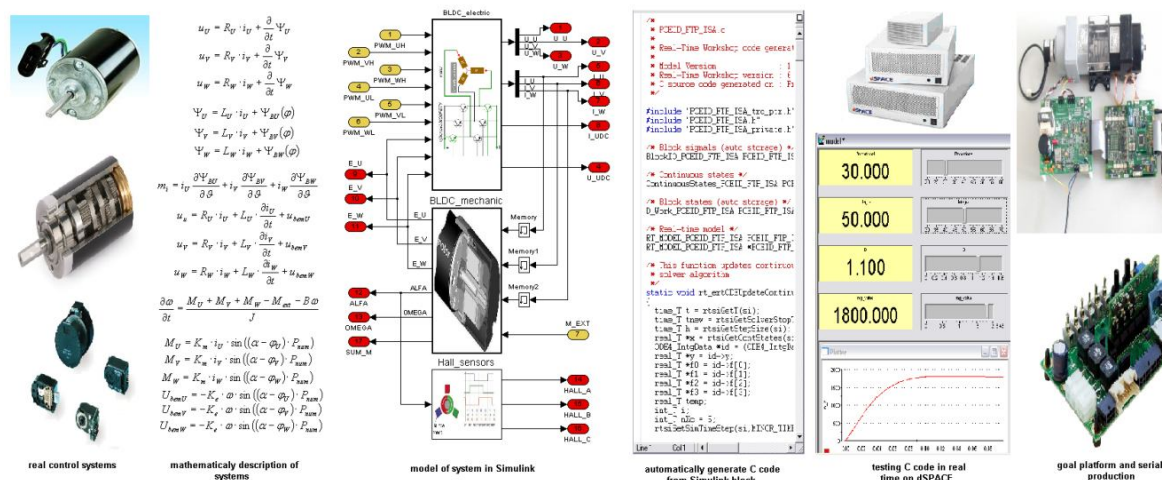
5.4 Modelování servopohonu

S vývojem techniky dochází k inovaci postupů pro vývoj řídicích aplikací. Současné trendy směřují k metodě „*Model-Based Design*“ (MBD), která se skládá z několika na sebe navazujících kroků, jejichž posloupnost je definována V-cyklem. Jednotlivé kroky V-cyklu již byly popsány v Kap. 4.1.3. Tato metoda začíná pronikat nejen do vědeckých či výzkumných oblastí, ale stále častěji i do komerční sféry napříč všemi průmyslovými odvětvími. Takto nastavený vývojový cyklus umožňuje verifikaci, validaci a testování v každé etapě vývoje produktu. Díky tomu umožňuje identifikaci a odstranění chyb již v počátcích vývojového cyklu, kdy odstranění těchto chyb není tak nákladné, jako redesign u prototypů. Další kladné aspekty, které tato metoda s sebou přináší, jsou: zkrácení vývojového času, snazší certifikace, snížení nákladů vývoje, rychlejší a snazší testování, snadněji zpracovatelná průvodní dokumentace, snížení poruchovosti atd. V neposlední řadě je nutné také zmínit hledisko vyšší bezpečnosti u rozsáhlých systémů, kdy není nutné testovat řídicí kód na reálném systému, které může být nebezpečné. Nejdříve se tento kód otestuje na HIL simulátoru a následně přeneseme na cílový systém.

Model Based Design je metoda rychlého a efektivního návrhu libovolného dynamického systému. Základem návrhového procesu je matematicko-fyzikální model systému v prostředí MATLAB/Simulink, který je během vývoje průběžně zpřesňován a jeho kvalita je testována při simulacích na reálném hardware. Disertační práce ukazuje možnosti MBD při návrhu řídicích algoritmů bezkartáčových stejnosměrných motorů (EC motorů) při senzorovém řízení. Výstupy simulací jsou přímo aplikovány v reálném hardware systému dSPACE, ke kterému je připojena uživatelská elektronika. MBD nabízí automatické generování kódu z modelu v Simulinku. Tato metoda nejen zásadně zkracuje vývojový cyklus, ale také odstraňuje obvyklé a časté chyby vznikající při manuálním psaní řídicího firmware.

Postup vývojových prací využitím modelování je graficky znázorněn na Obr. 19. V první části je většinou studium technické specifikace modelovaného zařízení, v tomto případě elektronicky komutovaného motoru. Následuje matematicko-fyzikální popis ve formě rovnic a vzájemných vztahů mezi elektrickými a mechanickými veličinami.

Design and development of control system for technical applications



Obr. 19 Grafické znázornění metody „Model Based Design“.

Vzhledem k tomu, že většina dynamických systémů je popsána složitými diferenciálními rovnicemi, se kterými lze jen obtížně pracovat, jsou v následující fázi převedeny do vhodného softwarového prostředí. V tomto případě je využito programového prostředí MATLAB/Simulink. V prostředí Simulinku se práce ze složitých diferenciálních rovnic změní v grafické programování a propojování příslušných funkčních bloků.

V této fázi je už možné spustit simulaci vytvořeného modelu a průběžně kontrolovat správnost výsledků. Tato část bývá označována jako „Model-In-the-Loop“ simulování a neprobíhá v reálném čase.

Další fáze, označená jako „Software-in-the-Loop“ spočívá v automatickém generování kódu pomocí nadstavby Simulinku zvané Real Time Workshop. Tento kód, většinou v jazyce C, je možné testovat a porovnávat výsledky z předchozích simulací. Pokud jsou výsledky podle očekávání, následuje implementace kódu do hardwarového simulátoru.

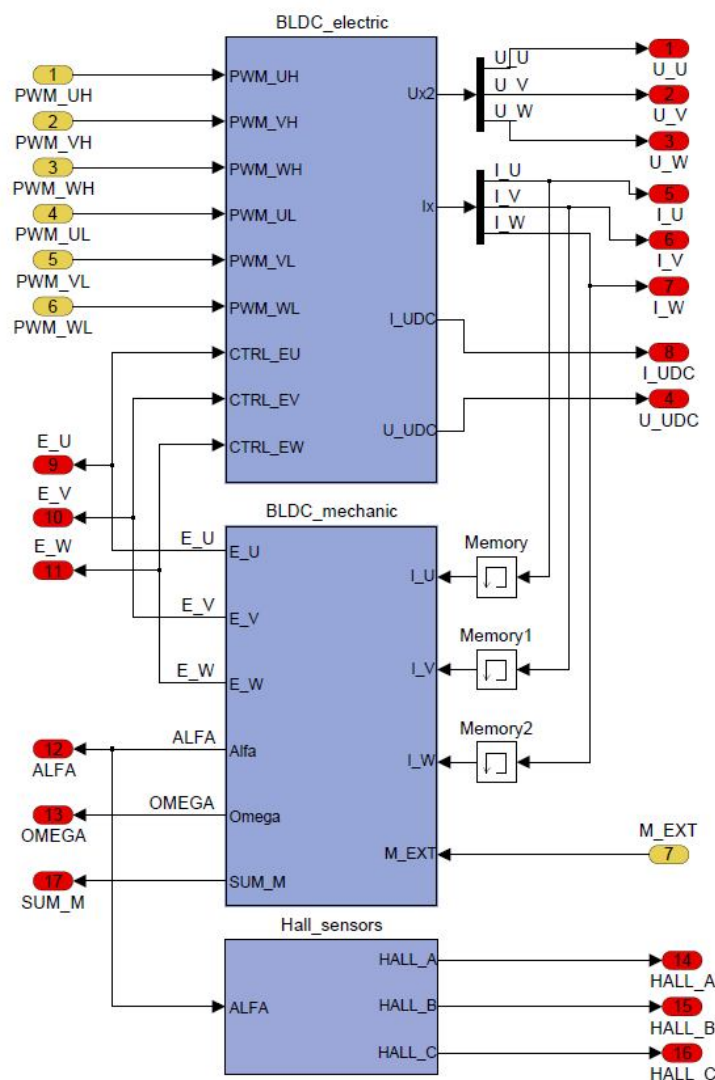
Hardwarovým simulátorem se rozumí speciálně upravený výkonný počítač, který dokáže odsimulovat převedený model do jazyka C v reálném čase. Simulátor obsahuje sadu periferních karet, jakou jsou vstupně/výstupní, čítače, A/D převodníky, komunikační a jiné karty, které zajišťují návaznost na řídicí (nebo řízený) systém. Tato předposlední fáze „Model Based Designu“ je označována jako „Hardware-in-the-Loop“ a umožňuje velmi efektivně upravovat a optimalizovat vzniklý řídicí systém. Při řešení disertační práce byl

použitý systém dSPACE, který je plně kompatibilní s prostředním MATLAB/Simulink.

Pokud je výsledný řídicí systém přiměřeně optimalizován, lze ho pomocí příslušných knihoven nástavby „Real-Time-Workshop-Embedded-Coder“ přilinkovat do cílové „*embedded*“ platformy postavené např. na signálových procesorech dsPIC, Freescale, Texas Instrument, atd. Tím se uzavírá celý vývojový cyklus.

5.4.1 Modelování EC motoru v Simulinku

Na níže uvedeném Obr. 20 je znázorněn výpočtový model vytvořený v prostředí MATLAB/Simulink.



Obr. 20 Výpočtový model EC motoru v Simulinku.

Skládá se z několika samostatných bloků popisujících reálné chování EC motoru. Pro snazší orientaci ho lze rozdělit na tři základní části – elektrickou, mechanickou a senzorickou. Takto členěný pohled usnadňuje libovolnou aplikaci modelu do řídicích obvodů a složitějších systémů.

Tento model byl navržen na základě katalogových parametrů jednotlivých výrobců motorů a s dostatečnou přesností popisuje jejich reálné chování. Přes grafické uživatelské rozhraní je možné specifikovat až 20 různých parametrů popisujících elektrickou a mechanickou část stroje. Takto vytvořený model lze dále zapouzdřit do jednoho funkčního bloku a využít v libovolných dalších simulacích.

5.4.1.1 Elektrická část pohonu

Elektrická část modelu je modelem struktury zapojení a chování stejnosměrného EC motoru. Poskytuje na svých výstupních svorkách základní elektrické parametry, jako jsou proudy a napětí jednotlivých vinutí. Jako vstupní parametry jsou vyžadovány konstrukční parametry prvků a příslušné řídicí signály od nadřazených bloků.

Diferenciální rovnice (1), (2), (3) popisují elektrické chování stejnosměrného motoru a jsou řešeny numerickými metodami v Simulinku. Vypočítané průběhy aktuálních napětí fází mohou být využity např. při bezsenzorovém řízení pro detekci polohy rotoru. Jmenovitě

$$u_U = R_U \cdot i_U + \frac{\partial}{\partial t} \Psi_U \quad (1)$$

$$u_V = R_V \cdot i_V + \frac{\partial}{\partial t} \Psi_V \quad (2)$$

$$u_W = R_W \cdot i_W + \frac{\partial}{\partial t} \Psi_W \quad (3)$$

kde R_U, R_V, R_W $[\Omega]$ - jsou odpory jednotlivých vinutí,

u_U, u_V, u_W $[V]$ - jsou jednotlivá fázová napětí,

i_U, i_V, i_W $[A]$ - jsou fázové proudy.

Jednotlivé spřažené magnetické toky jsou dále určeny rovnicemi (4), (5) a (6), tedy

$$\Psi_U = L_U \cdot i_U + \Psi_{BU}(\varphi), \quad (4)$$

$$\Psi_V = L_V \cdot i_V + \Psi_{BV}(\alpha), \quad (5)$$

$$\Psi_W = L_W \cdot i_W + \Psi_{BW}(\vartheta), \quad (6)$$

kde L_U, L_V, L_W $[H]$ - jsou indukčnost vinutí,

$\Psi_{BU}, \Psi_{BV}, \Psi_{BW}$ $[Wb]$ - jsou spřažené magnetické toky jednotlivých fází (periodické funkce s periodou 2π , navzájem fázově posunuté o $2\pi/3$).

Na základě fázových proudů a aktuální polohy rotoru, lze vypočítat i celkový vnitřní moment motoru podle rovnice (7).

$$m_i = i_U \frac{\partial \Psi_{BU}}{\partial \alpha} + i_V \frac{\partial \Psi_{BV}}{\partial \beta} + i_W \frac{\partial \Psi_{BW}}{\partial \vartheta} \quad (7)$$

Po úpravách a sloučením předešlých diferenciálních rovnic lze získat jednodušší tvar, popisující aktuální fázová napětí, viz (8), (9) a (10). Z rovnic je zřejmé, že aktuální hodnota napětí je úměrná součtu úbytku na sériové kombinaci $R+L$ a vnitřního zdroje indukovaného napětí, které vzniká při otáčení rotoru.

$$u_u = R_U \cdot i_U + L_U \cdot \frac{\partial i_U}{\partial t} + u_{bemU} \quad (8)$$

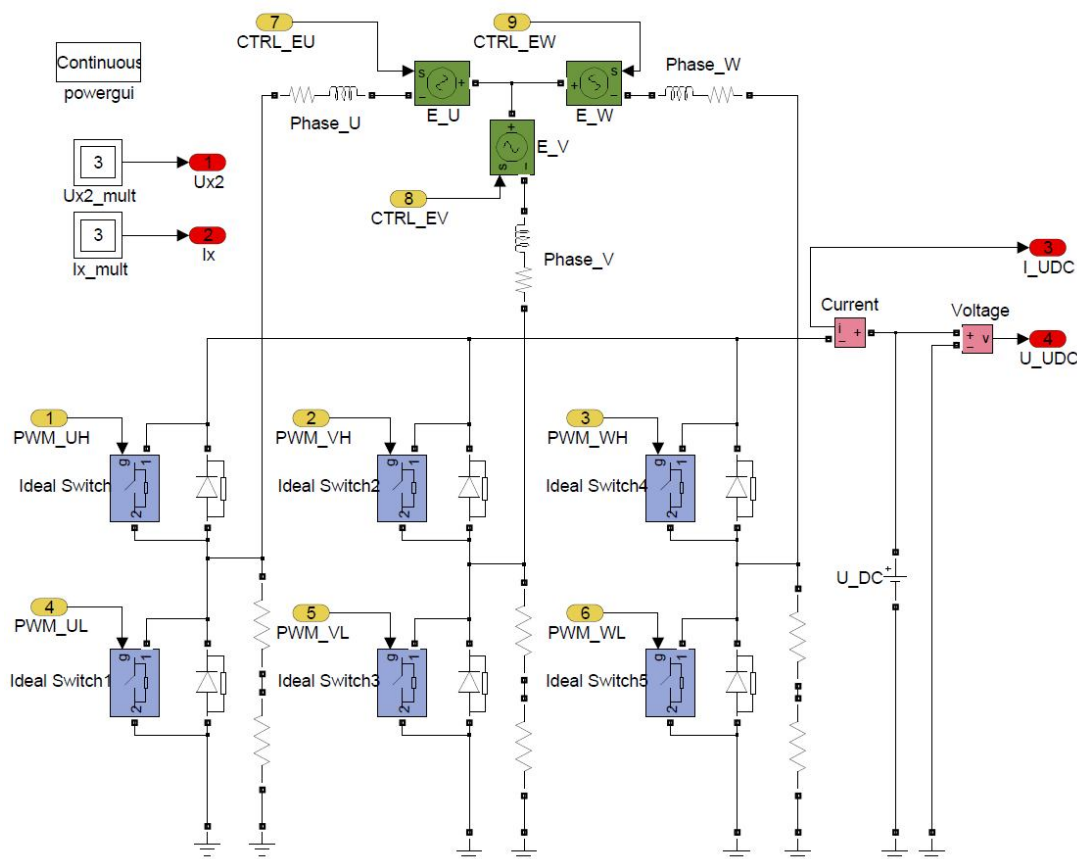
$$u_V = R_V \cdot i_V + L_V \cdot \frac{\partial i_V}{\partial t} + u_{bemV} \quad (9)$$

$$u_W = R_W \cdot i_W + L_W \cdot \frac{\partial i_W}{\partial t} + u_{bemW} \quad (10)$$

kde $\frac{\partial i_U}{\partial t}, \frac{\partial i_V}{\partial t}, \frac{\partial i_W}{\partial t}$ - jsou derivace fázových proudů podle času,

$u_{bemU}, u_{bemV}, u_{bemW} [V]$ - jsou indukovaná napětí v jednotlivých fázích motoru.

Elektrickou část, matematicky popsanou rovnicemi (1) až (10), lze velmi jednoduše vytvořit pomocí knihoven toolboxu SimPower obsaženého v Simulinku viz Obr. 21. Lze na ni pohlížet jako na elektrické schéma elektronicky komutovaného motoru a příslušného výkonového mostu, který může být tvořen libovolnými tranzistory. Z důvodu zvýšení rychlosti simulace byly MOSFET tranzistory nahrazeny ideálními spínači se zpětnými diodami. Tato úprava velmi citelně zkrátí čas potřebný pro simulační výpočet. Pro další zvýšení rychlosti simulace je možné elektrickou část vytvořit z běžných bloků Simulinku a nepoužívat nastavbu SimPower. Je to však za cenu přehlednosti výsledného modelu.



Obr. 21 Model elektrické části v Simulinku (SimPower).

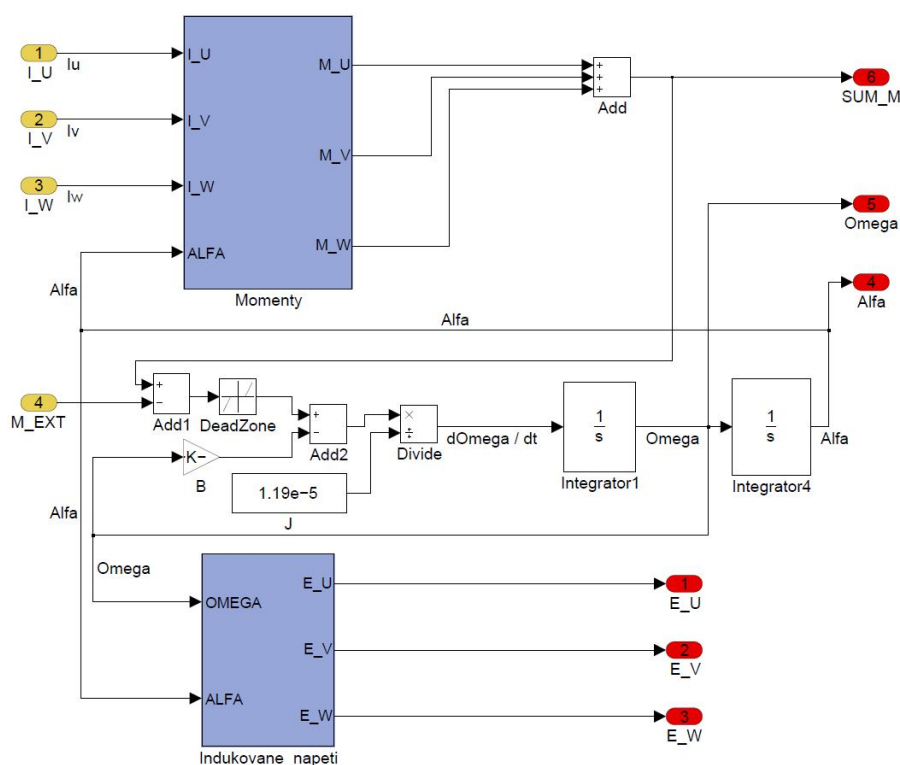
5.4.1.2 Mechanická část pohonu

Mechanická část modelu je založena na pohybové rovnici (11), tedy

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{M_U + M_V + M_W - M_{ext} - B \cdot \omega}{J} \quad (11)$$

kde	M_U, M_V, M_W	$[N \cdot m]$	- jsou točivé momenty fázových vinutí,
	M_{ext}	$[N \cdot m]$	- je vnější brzdící moment (zátěž),
	B	$\left[\frac{N \cdot m}{rad / s} \right]$	- je koeficient viskozního tření,
	ω	$[rad / s]$	- je úhlová rychlost rotoru,
	J	$[kg \cdot m^2]$	- je moment setrvačnosti rotujících hmot,
	$\frac{\partial \omega}{\partial t}$		- je úhlové zrychlení,

a tvoří interakci mezi mechanickými a elektrickými veličinami motoru. Podle výstupních proudů z elektrické části jsou určeny aktuální pohybové momenty jednotlivých vinutí. V modelu je také počítáno s útlumovými silami, které jsou způsobeny třením při rotaci a externím brzdícím momentem. Aby se rotor nezačal otáčet již při velmi malém externím točivém momentu, je vymezena „mrtvá zóna“, při které zůstává hřídel motoru v klidu.



Obr. 22 Model mechanické části v Simulinku.

Mechanická část modelu, popsaná rovnicí (11), je uvedena na Obr. 22. Skládá se ze základních bloků prostředí Simulink. Tuto část lze dále rozdělit na 3 menší podbloky:

- výpočet okamžitých točivých momentů fází (horní modrý blok),
- výpočet okamžitých indukovaných napětí fází (dolní modrý blok)
- výpočet úhlové rychlosti a vnitřního úhlu motoru po dvojí integraci pohybové rovnice (11) (bílé bloky).

Výpočet okamžitých točivých momentů

Okamžité točivé momenty vinutí jsou počítány na základě vstupních údajů o velikosti proudu vinutími z elektrické části modelu. Jsou uvažovány momentová konstanta motoru a aktuální hodnota vnitřního úhlu motoru. Model výpočtu točivých momentů mechanické části motoru, viz Obr. 23, je vytvořený z následujících rovnic (12), (13) a (14):

$$M_U = K_m \cdot i_U \cdot \sin((\alpha - \varphi_U) \cdot P_{num}) \quad (12)$$

$$M_V = K_m \cdot i_V \cdot \sin((\alpha - \varphi_V) \cdot P_{num}) \quad (13)$$

$$M_W = K_m \cdot i_W \cdot \sin((\alpha - \varphi_W) \cdot P_{num}) \quad (14)$$

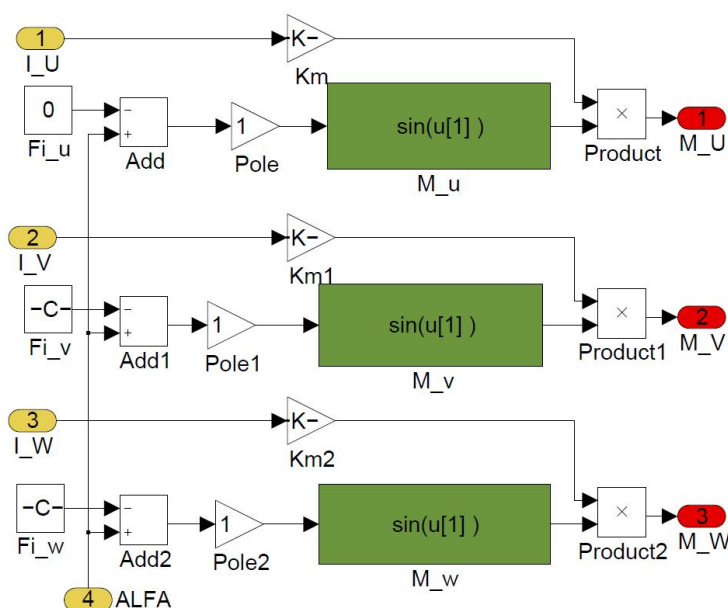
kde K_m $\left[\frac{N \cdot m}{A} \right]$ - je momentová konstanta motoru,

α $[rad]$ - je aktuální úhel rotoru vůči statoru,

$\varphi_U, \varphi_V, \varphi_W$ $[rad]$ - jsou fázové posuny fázových proudů

P_{num} - je počet pólových dvojic motoru.

Výsledný moment je odečten od vnějšího zatěžovacího momentu a momentu viskózního tření působícího na rotor (roste s úhlovou rychlostí rotoru). Výsledný moment vstupuje zpět do pohybové rovnice. Vložená „mrtvá zóna“ (pásmo necitlivosti – suché tření) je opět nastavitelná před začátkem simulace v grafickém uživatelském rozhraní.



Obr. 23 Výpočet okamžitých točivých momentů vinutí.

Výpočet okamžitých hodnot indukovaných fázových napětí

Okamžitá indukovaná napětí jednotlivých fází jsou počítána v podbloku, který je uvedený na Obr. 24. Hodnoty napětí jsou počítány z rovnic (15), (16) a (17), ve kterých je elektrická konstanta motoru násobena aktuální úhlovou rychlostí a

polohou rotoru. Indukovaná napětí vstupují zpět do elektrické části motoru. V případě bezsenzorového řízení lze hodnoty využít pro detekci polohy rotoru.

$$U_{bemU} = -K_e \cdot \omega \cdot \sin((\alpha - \varphi_U) \cdot P_{num}) \quad (15)$$

$$U_{bemV} = -K_e \cdot \omega \cdot \sin((\alpha - \varphi_V) \cdot P_{num}) \quad (16)$$

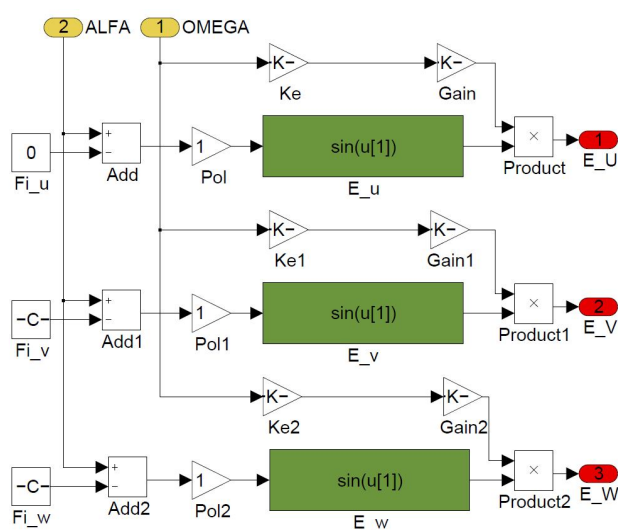
$$U_{bemW} = -K_e \cdot \omega \cdot \sin((\alpha - \varphi_W) \cdot P_{num}) \quad (17)$$

kde K_e $\left[\frac{rad/s}{V} \right]$ - je elektrická konstanta motoru,

α $[rad]$ - je aktuální úhel rotoru vůči statoru,

$\varphi_U, \varphi_V, \varphi_W$ $[rad]$ - jsou fázové posuny vinutí,

P_{num} - je počet pólových dvojic motoru.



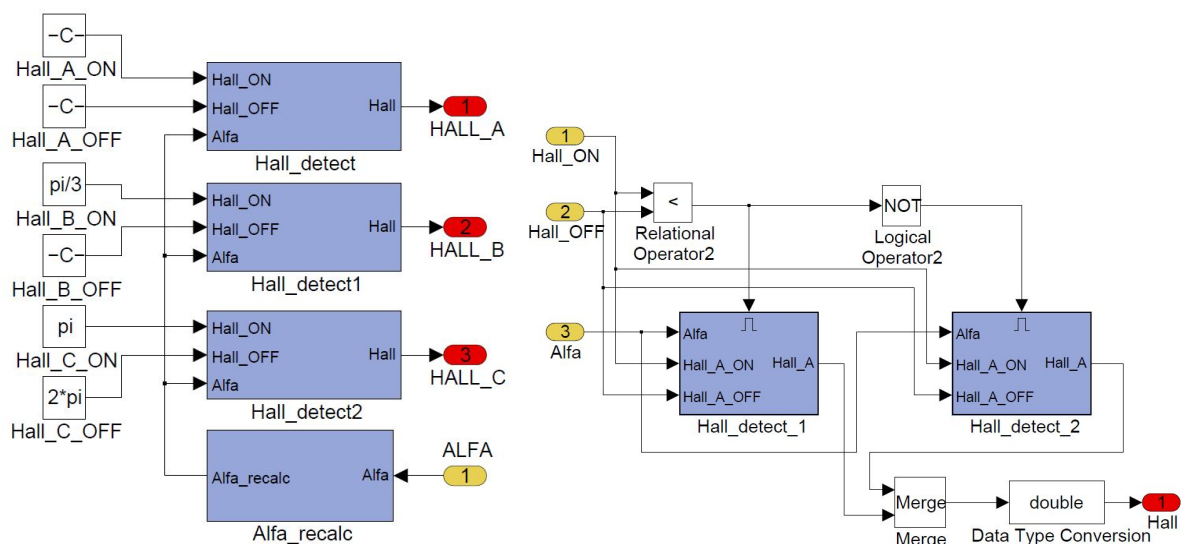
Obr. 24 Výpočet okamžitých indukovaných napětí vinutí.

5.4.1.3 Snímací část pohonu

Poslední částí modelu je část senzorická a tvoří ji 3 Hallovy snímače. Grafický model je uveden na Obr. 25 vlevo. Snímače jsou umístěny na statorové části motoru, na rotoru je pevně uchycen magnet. Tento způsob snímání polohy je v průmyslové praxi nejčastější a obsahuje ho většina komerčně

prodáváných motorů. Trojice Hallovyh snímačů určuje polohu rotoru s rozlišením 60° , což je u většiny servopohonů dostatečná přesnost. Pro aplikace s vyššími metodami řízení, jako je vektorové řízení nebo přímé řízení momentu, už není přesnost tohoto snímání dostačující. V tomto případě je nutné osadit motor přesnějšími snímači, které se projeví i na koncové ceně pohonu. Výstupní informace Hallovyh snímačů je kódována ve 3 bitech, které tvoří 6 kombinací na jednu elektrickou otáčku motoru.

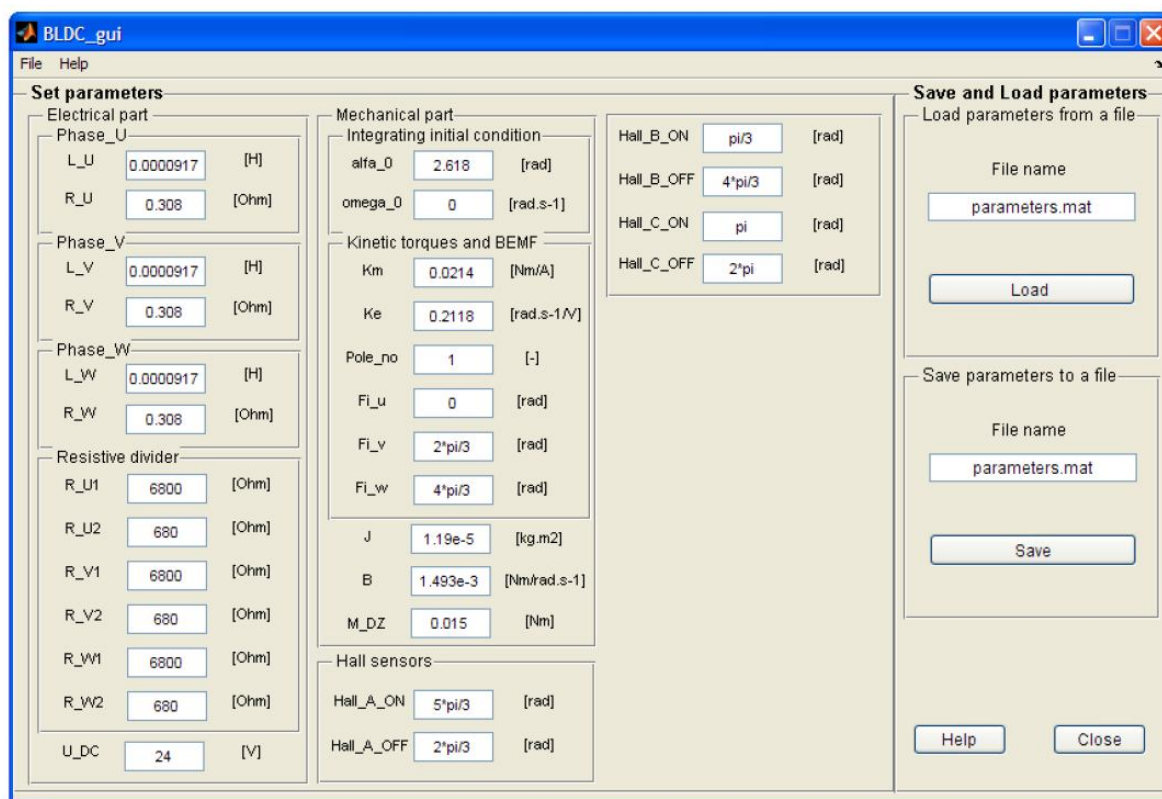
Vstupním signálem pro blok snímání polohy je okamžitá hodnota úhlu rotoru vůči statoru vypočítaná z mechanické části po dvojnásobné integraci pohybové rovnice (11). Následuje normování polohového úhlu v rozmezí 0 až 360° , ze kterého je dál signál veden do 3 bloků představujících Hallovy snímače. Vnitřní struktura snímače je uvedena na Obr. 25 vpravo. Každý snímač má nastavený interval, ve kterém je aktivní. Velikost intervalu každého snímače je 180° . Tím vznikne kódovaný 3-bitový signál určující absolutní polohu rotoru vůči statoru, který je vyhodnocen řídicí logikou. Na základě jeho stavu jsou spínány příslušné tranzistory trojfázového mostu. Takto je simulováno chování reálného EC motoru s Hallovyhmi snímači.



Obr. 25 Model snímací části se 3 Hallovyhmi snímači v Simulinku.

5.4.1.4 Grafické uživatelské prostředí

Grafické uživatelské prostředí, GUI, je součástí modelu motoru a slouží ke snadnému zadávání parametrů motoru a řízení průběhu simulace. GUI bylo rovněž vytvořeno v prostředí MATLAB/Simulink, a pro jeho tvorbu jsou implementovány speciální knihovny ovládacích prvků. Ukázka ovládacího okna je uvedena na Obr. 26.

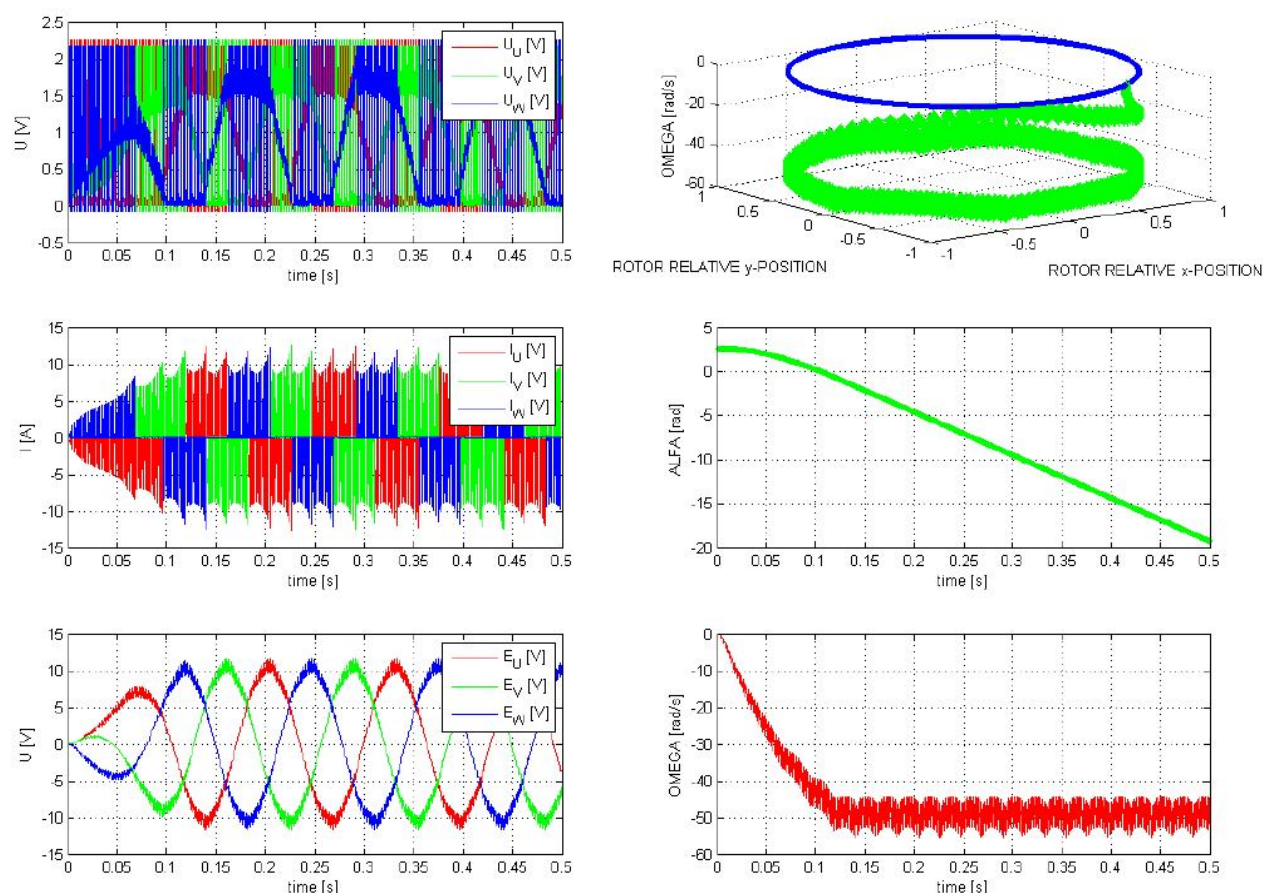


Obr. 26 Grafické uživatelské rozhraní - GUI.

Ovládací okno je také pomyslně rozděleno na 3 části – elektrickou, mechanickou a senzorickou. V každé z nich lze nastavit odpovídající parametry motoru z katalogového listu výrobce. Jednotlivé konfigurace lze uložit nebo vyčíst z předem připraveného souboru.

Po spuštění simulace jsou simulovaná data uložena do matice v pracovní ploše MATLABu – „Workspace“. Následně lze vybrat žádané průběhy a funkční závislosti, které jsou prezentovány v novém okně formou grafu. Ukázka průběhů ze simulace motoru Maxon (EC45) je uvedena na Obr. 27. Vložené grafy vykreslují závislosti indukovaných napětí při rotaci, proudy jednotlivými fázemi, okamžitou úhlovou rychlost a úhel rotoru vůči statoru.

V trojrozměrném grafu je vykreslena závislost okamžitého úhlu rotoru vůči statoru a úhlové rychlosti.



Obr. 27 Ukázka výstupů simulace motoru Maxon.

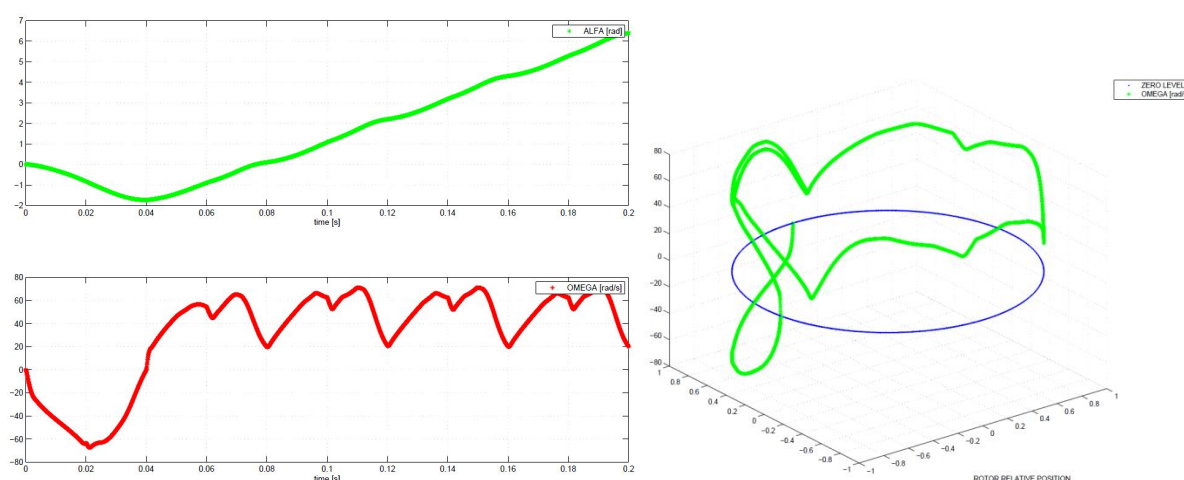
5.4.1.5 Ukázka výstupů ze simulace rozběhu motoru

Pro potřeby simulace rozběhu motoru při senzorovém i bezsenzorovém řízení ve formě „force commutation“, tj. frekvenční rozběh po předem dané rampě, byl vytvořen jednoduchý model řídicí jednotky. Ten se skládá z šestikanálového generátoru PWM signálu, který spíná příslušné ideální spínače elektrické části motoru podle polohy vypočítané modelem. V této etapě simulace může nebo nemusí být použitý proudový regulátor. Řízení neprobíhá v uzavřené smyčce, ale regulátor omezuje maximální hodnotu fázových proudů na předem stanovenou hodnotu.

Rozběh EC motoru probíhá většinou bez znalosti výchozí polohy, u senzorického řízení s Hallovými snímači je známa poloha přibližně v intervalu 60° , což nemusí být vždy dostatečná přesnost pro zvolení správné spínací kombinace. V této části řízení je tedy motor roztáčen v tzv. frekvenčním režimu

(po rozběhové rampě), kdy jsou otáčky motoru postupně zvyšovány v otevřené regulační smyčce.

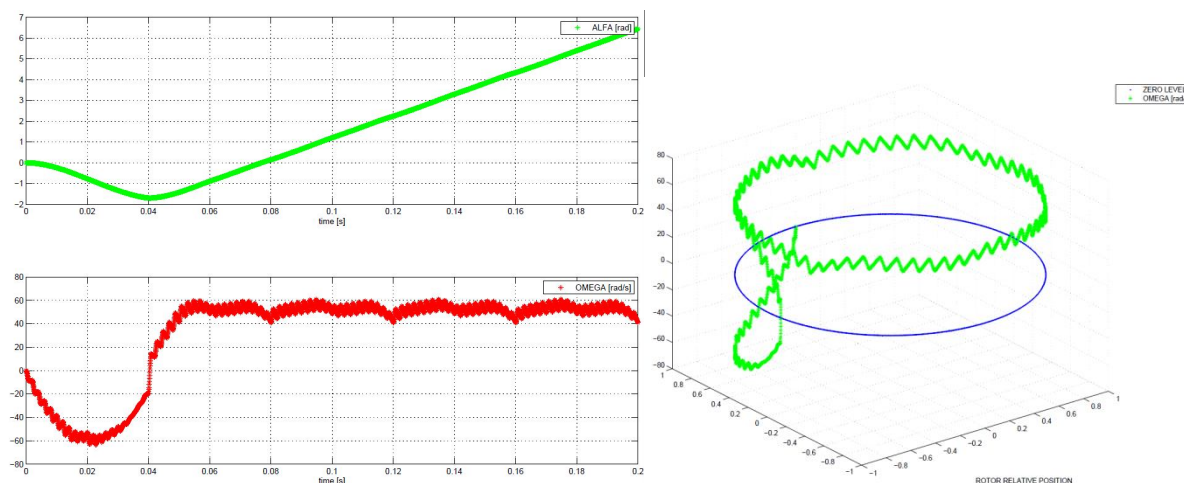
Hlavním problémem frekvenčního rozběhu EC motoru je volba správné rychlosti komutace. Vzhledem k tomu, že poloha rotoru není známá, může docházet k předbíhání rotoru a magnetického pole. Rozběh tedy není plynulý a projeví se ve zvlnění momentové charakteristiky. Příklad nevhodně nastavené rampy je uveden na Obr. 28. To může způsobit (pokud na rotor působí příliš velký zatěžovací moment) až uvíznutí motoru v rovnovážné poloze a neúspěšný rozběh.



Obr. 28 Simulace rozběhu motoru s nevhodnými parametry.

Pokud nejsou implementovány dostatečné ochrany a řídicí elektronika nerozpozná tento stav, může zvýšení proudu fází poškodit výkonový spínací most. Proto je nutné rozběhovou fází dostatečně analyzovat a zvolit optimální zvyšování spínací frekvence elektronického komutátoru.

Pokud jsou známy výchozí podmínky, tzn. moment připojené zátěž na rotoru, její moment setrvačnosti a moment tření, lze pomocí modelu motoru najít správné zvyšování kmitočtu komutace a optimalizovat momentovou a rozběhovou charakteristiku. Při simulacích byly použité katalogové údaje motoru fy Maxon (EC45). Optimalizovaný rozběhový průběh je uveden na Obr. 29. Na obou průbězích je viditelné i prvotní přechod rotoru do nejbližší rovnovážné polohy.



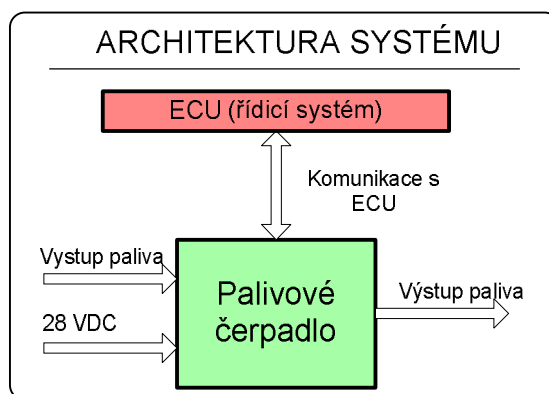
Obr. 29 Optimalizovaný rozběh motoru.

5.4.2 Identifikace systému, nastavení regulátorů

V této části je popsán postup sestavení matematického modelu dynamického systému cestou matematického modelování a využitím metod experimentální identifikace. Dále je zde uveden návrh optimálního řízení s respektováním požadavků na jeho chování. Příkladem identifikovaného systému je čerpadlo určené k dodávce paliva do leteckého motoru. Na tento systém jsou rovněž kladeny zvýšené požadavky na bezpečnost a spolehlivost, specifikované leteckými normami. Z těchto požadavků vyplývají i zvýšené nároky na řídicí systém. Identifikace a optimalizace regulačních konstant byla opět provedena v programovém prostředí MATLAB/Simulink.

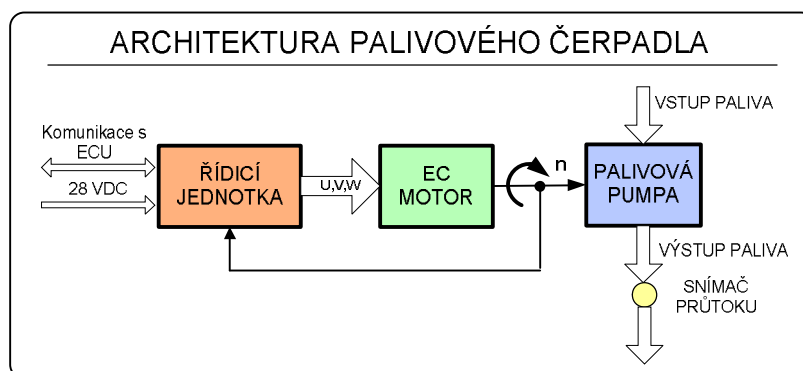
5.4.2.1 Popis identifikovaného systému

Při identifikaci dynamického systému se snažíme o nalezení matematického popisu, který by reprezentoval chování tohoto systému. Identifikovaným systémem je hydraulický systém palivového čerpadla. Jeho základní architektura je uvedena na Obr. 30. Tento systém komunikuje s nadřazenou řídicí jednotkou (ECU), která určuje požadavek na dodávku paliva. Vstupy do tohoto systému jsou napájecí napětí pro elektronicky komutovaný motor a přívod paliva. Výstupem je požadovaný průtok paliva dodávaný do motoru.



Obr. 30 Blokové schéma palivového systému.

Palivové čerpadlo se skládá ze tří základních částí, a to z elektrické řídicí jednotky, motoru a pumpy, viz Obr. 31. Řídicí jednotka přijímá požadavek na průtok paliva od nadřazené řídicí jednotky ECU a podle tohoto požadavku je řízen EC motor. Otáčkami motoru se pak řídí průtok paliva palivovou pumpou. Na výstupu z palivové pumpy je umístěn snímač průtoku. Pro přesné zpětnovazební řízení není možné využít zpětnou vazbu od snímače průtoku, který zavádí příliš velké zpoždění. Pro požadovanou dynamiku systému na skok řízení je tudíž nepoužitelný. Proto je zde zavedena zpětná vazba od otáček motoru, které jsou přímo úměrné průtoku.

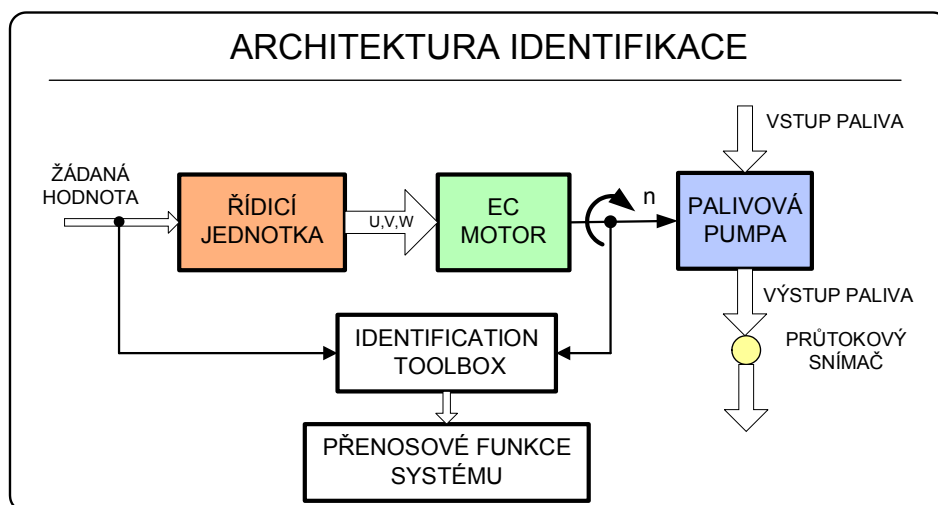


Obr. 31 Vnitřní struktura palivového čerpadla.

5.4.2.2 Identifikace

Aby bylo možné tento systém řídit podle požadavků na jeho odezvu je nutné sestavit matematický model. Protože se jedná o nelineární dynamický systém tvořený elektrickou, mechanickou a hydraulickou částí, byl by matematický popis na základě fyzikální podstaty značně složitý. Proto byl využita tzv. „Black box“ metoda identifikace založená na sledování odezvy systému na skokovou změnu řízení. Při aplikaci této metody je nutné rozpojit

zpětnou vazbu od otáček motoru a zaznamenat přechodovou charakteristiku systému. Blokové schéma tohoto zapojení je znázorněno na Obr. 32.

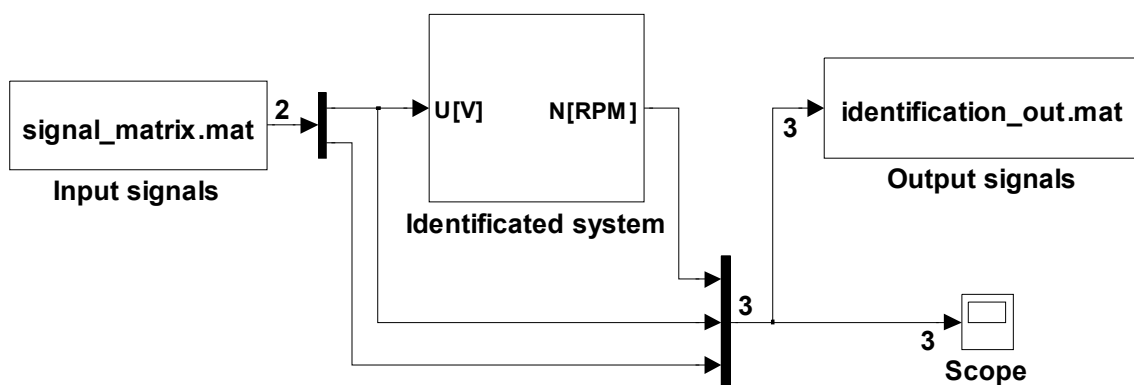


Obr. 32 Blokové schéma pro identifikaci systému.

Sledovanými parametry jsou vstupní skoková změna PWM, která je přepočítána na napětí a výstupní přechodová odezva otáček EC motoru. Tyto naměřené charakteristiky jsou dále importovány do MATLABu, kde jsou zpracovány „*Identification toolboxem*“. Výsledkem identifikace byl popis systému dvěma přenosovými funkcemi prvního řádu.

5.4.2.3 Model palivového čerpadla a simulace

Na základě získaného matematického popisu z „*Identification toolbox*“ byl vytvořen model v MATLAB/Simulink. Tento model je sestaven ze základních bloků knihovny Simulinku a jeho struktura je uvedena na Obr. 33. Vstupem do modelu palivového čerpadla je naměřená skoková změna napětí a výstupem je přechodová odezva modelu na tuto změnu. Oba dva parametry jsou zaznamenány pomocí bloku Scope. Aby bylo možné porovnat odezvu modelu a reálné soustavy na skok řízení je do tohoto bloku ještě přivedena naměřená přechodová charakteristika otáček reálného systému palivového čerpadla.



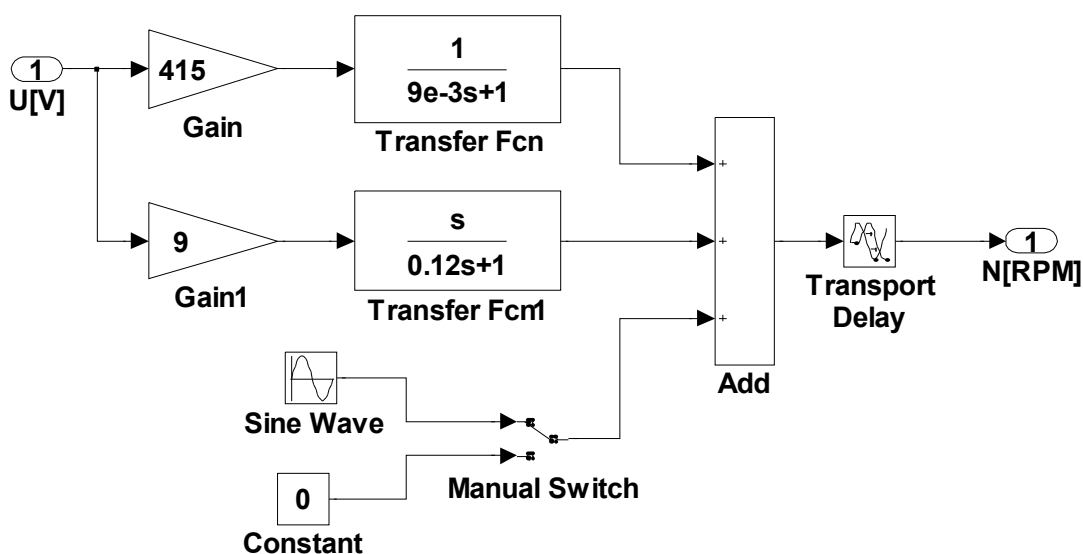
Obr. 33 Model systému palivového čerpadla.

Vnitřní struktura modelu je zobrazena na Obr. 34. Tento model je složen ze dvou přenosových funkcí (18), (19).

$$F_1(s) = 415 \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^{-3}s + 1} \quad (18)$$

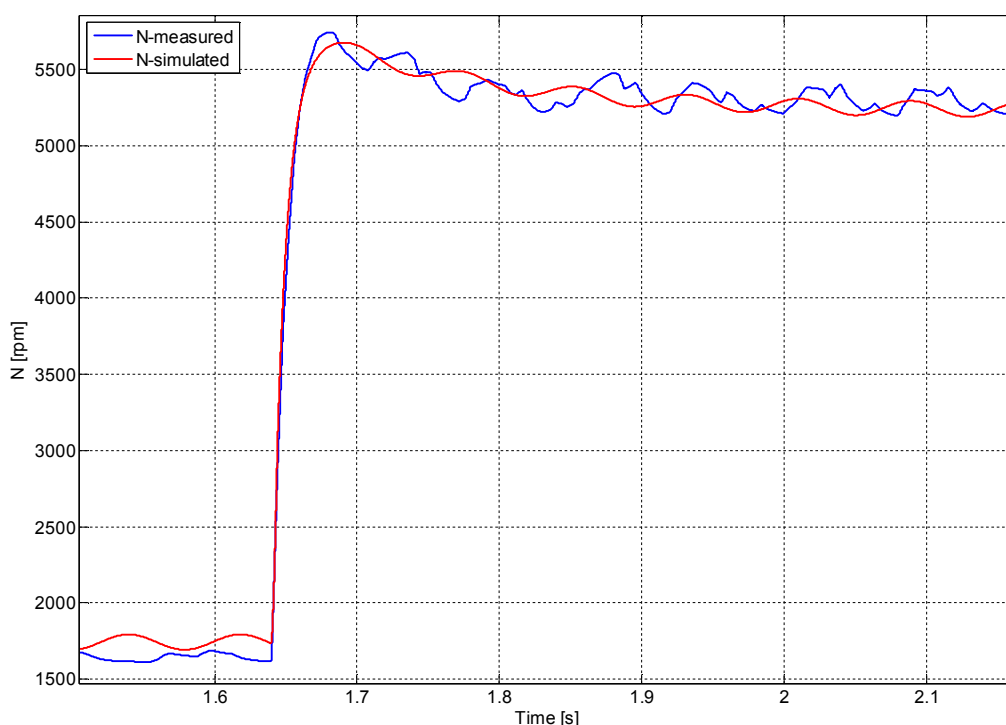
$$F_2(s) = 9 \cdot \frac{s}{0,12s + 1} \quad (19)$$

Přenosové funkce určují ustálené stavy a dynamiku systému. K těmto dvěma signálům je ještě přičten signál z bloku „Sine Wave“, který simuluje rušivé signály v reálné soustavě. Perioda rušivého signálu může být získána z reálné odezvy systému pomocí frekvenční analýzy FFT.



Obr. 34 Vnitřní struktura modelu.

Porovnání odezvy modelu a reálného hydraulického systému s čerpadlem je uvedeno na Obr. 35. Odezva byla pozorována na jednotkovém skoku otáček čerpadla z hodnoty 1700 min^{-1} na cca 5200 min^{-1} . Modrou barvou je vykreslena přechodová charakteristika modelu a červeně přechodová charakteristika reálného čerpadla. Z grafu je patrné, že simulace získané přenosové funkce dostatečně odpovídá chování reálného systému čerpadla. S modelem lze tedy pracovat při tvorbě řídicího algoritmu a při nastavování vnitřních regulačních smyček.



Obr. 35 Odezva modelu a reálného systému na jednotkový skok.

5.4.2.4 Sestavení modelu řízení

K předešlému modelu byl přidán blok „Controller“, ve kterém je implementována regulační struktura diskretních PSD regulátorů s nadřazeným otáčkovým a podřízeným proudovým (příp. výkonovým) regulátorem. Výkonový regulátor bývá používán z důvodu lepších vlastností řízení při změnách napájecího napětí. Tato struktura je volena záměrně, protože totožná stavba PSD regulátoru je využita i při implementaci na cílový HW (DPS dsPIC30F).

Zvolený PSD regulátor lze pomocí Z-transformace získat následujícím postupem. Vycházíme ze základní rovnice spojitého PID regulátoru (20):

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_I \cdot \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (20)$$

Jednotlivé složky regulátoru se Z transformací, podle [21], převedou do následujícího tvaru:

$$\text{proporcionální složka je} \quad K_p \cdot e \quad (21)$$

$$\text{integrální složka je} \quad \frac{K_I}{1 - z^{-1}} \cdot e \quad (22)$$

$$\text{derivační složka je} \quad K_D \cdot (1 - z^{-1}) \cdot e \quad (23)$$

Výstup regulátoru je součtem (21), (22), (23), tedy:

$$u = e \cdot \left(K_p + \frac{K_I}{1 - z^{-1}} + K_D \cdot (1 - z^{-1}) \right) \quad (24)$$

a po úpravě,

$$u = e \cdot \left(\frac{(K_p + K_I + K_D) + (-K_p - 2K_D) \cdot z^{-1} + K_D \cdot z^{-2}}{1 - z^{-1}} \right) \quad (25)$$

Rovnice (25) lze zpětnou transformací převést na diferenční rovnici, kterou již lze snadno aplikovat do signálového procesoru. Pokud se pohybujeme v diskrétní oblasti, složitá rovnice PID regulátoru, obsahující integraci a derivování se změní na jednoduché sčítání a odčítání, přičemž je potřeba ukládat do paměti pouze poslední 3 regulační odchylky a poslední hodnotu výstupu z regulátoru. To značně sníží výpočetní čas a nárok na použitý mikroprocesor.

Výsledný tvar rovnice je tedy následující:

$$u = u(T-1) + e(T) \cdot K_1 + e(T-1) \cdot K_2 + e(T-2) \cdot K_3$$

kde,

$$K_1 = K_p + K_I + K_D \quad (T) \quad \text{je aktuální vzorek,}$$

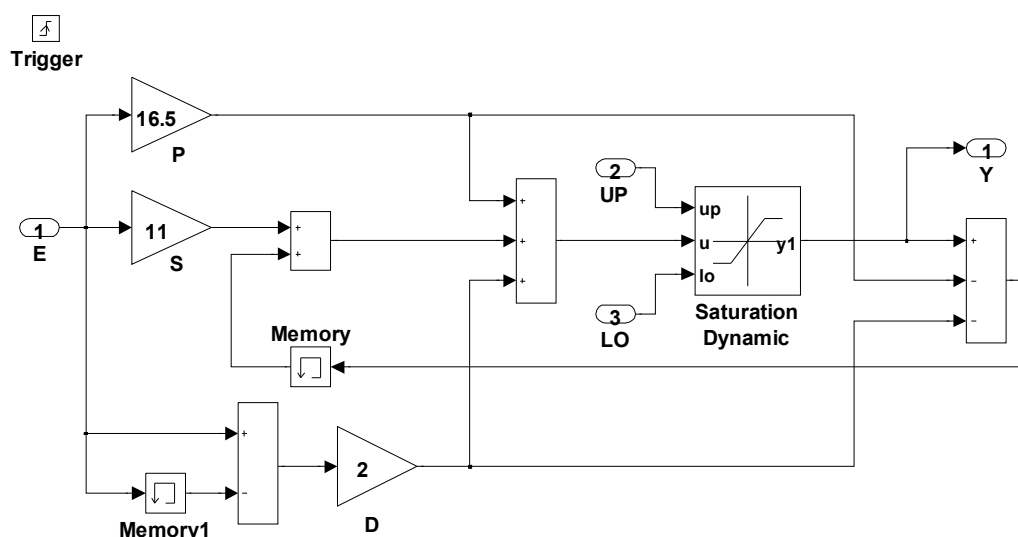
$K_2 = -K_p - 2K_D$ $(T-1)$ je předcházející vzorek,

$K_2 = K_D$ $(T-2)$ je 2. předcházející vzorek,

e je regulační odchylka, rozdíl žádané a skutečné hodnoty

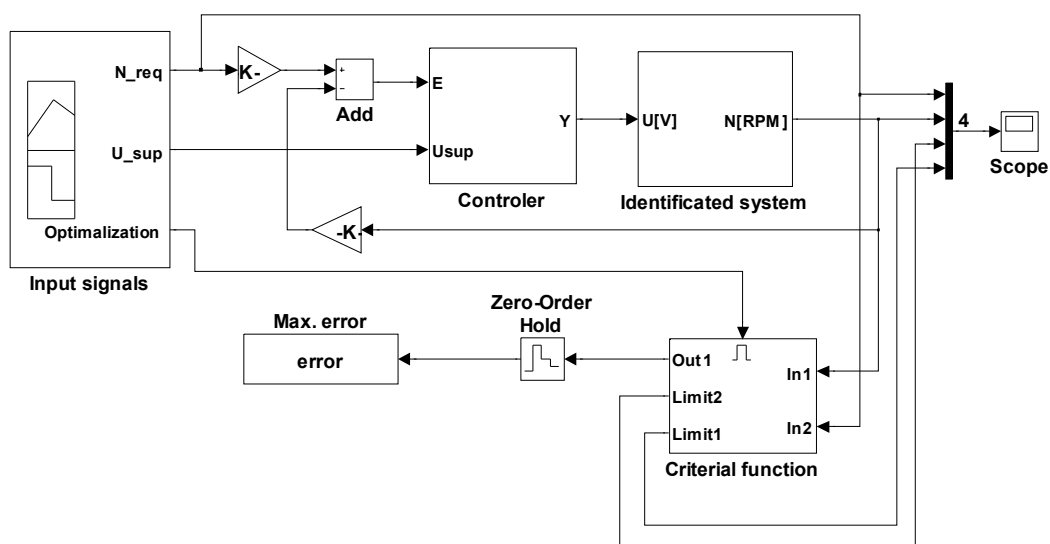
Grafická realizace PSD regulátoru v MATLAB/Simulinku popsaného těmito rovnicemi je uvedena na Obr. 36.

Vstupy do bloku „Controller“ jsou odchylka žádané a skutečné hodnoty otáček a napájecí napětí. Skutečné otáčky jsou přivedeny jako zpětná vazba z výstupu modelu čerpadla. Výstupem z regulátoru je akční veličina, která odpovídá hodnotě napětí. Blokové schéma regulační smyčky je uvedeno na **Obr. 37**.



Obr. 36 Vnitřní struktura PSD regulátoru sestavená v Simulinku.

Aby byly splněny požadavky na kvalitu regulace, byly konstanty regulátoru iteračně měněny a následné odezvy porovnávány metodou nejmenších čtverců s mezními charakteristikami. U metody nejmenších čtverců se počítá minimální odchylka od žádané charakteristiky. Pro definici mezních charakteristik, které určují požadavky na regulaci, byl vytvořen blok „Criterial function“, viz **Obr. 37**.



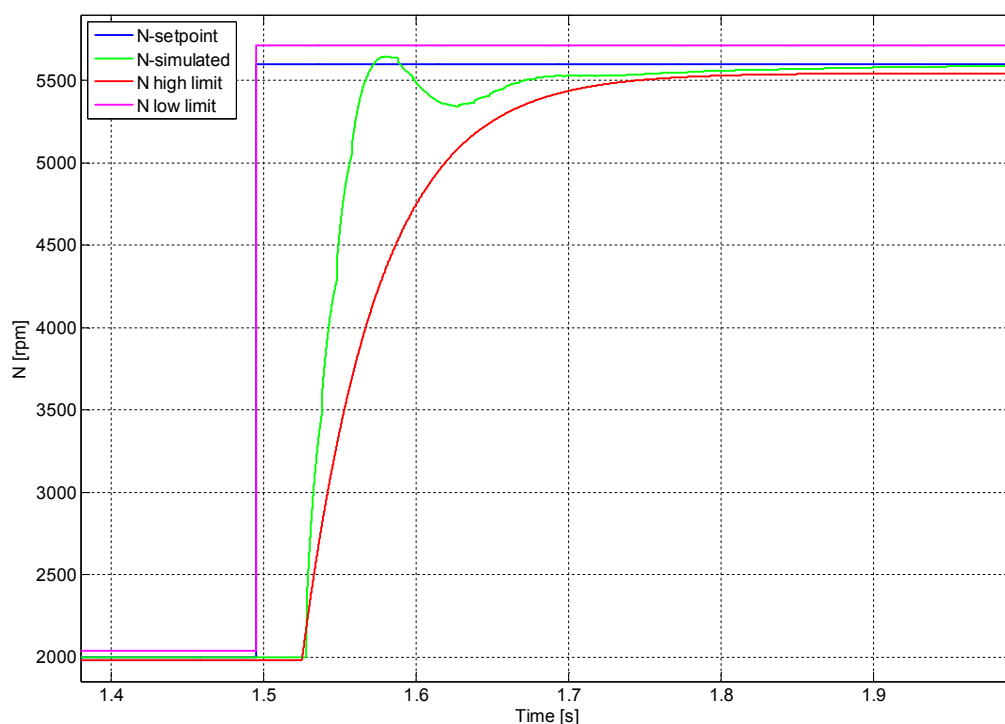
Obr. 37 Regulační smyčka systému s palivovým čerpadlem.

Zde jsou definovány maximální překmit nad požadovanou hodnotu (horní mez) a požadovaná dynamika řízeného systému (spodní mez). Horní mez je počítána procentuálně vzhledem k žádané hodnotě otáček a spodní mez je dána časovou konstantou, která určuje maximální dobu ustálení systému na žádané hodnotě otáček. Spodní mez je v modelu realizována přenosovou funkcí prvního řádu s požadovanou časovou konstantou.

5.4.2.5 Výsledky simulací

Na Obr. 38 je znázorněna výsledná odezva regulační smyčky s optimálně nastaveným regulátorem. V grafu jsou růžovou a červenou barvou znázorněny horní a spodní limity, které nesmí být při skokové změně otáček překročeny. Tyto limity vychází z technického zadání, kde bývá většinou definován povolený překmit a maximální čas dosažení požadované hodnoty. Hodnoty jsou většinou určeny z dynamiky celého hydraulického okruhu a pohonné jednotky. Modrou barvou je dále znázorněna požadovaná hodnota otáček. Zelenou barvou pak výsledek simulace a skutečná odezva regulátoru.

Z výsledku lze konstatovat, že navržený regulátor splňuje požadavky na kvalitu regulace podle technické specifikace a lze jej použít pro reálný systém. Celá metodika se ukazuje jako vhodná pro optimální návrh řídicích algoritmů. Použitím této metody byl i snížen celkový vývojový čas a náklady na přípravu řídicího algoritmu.

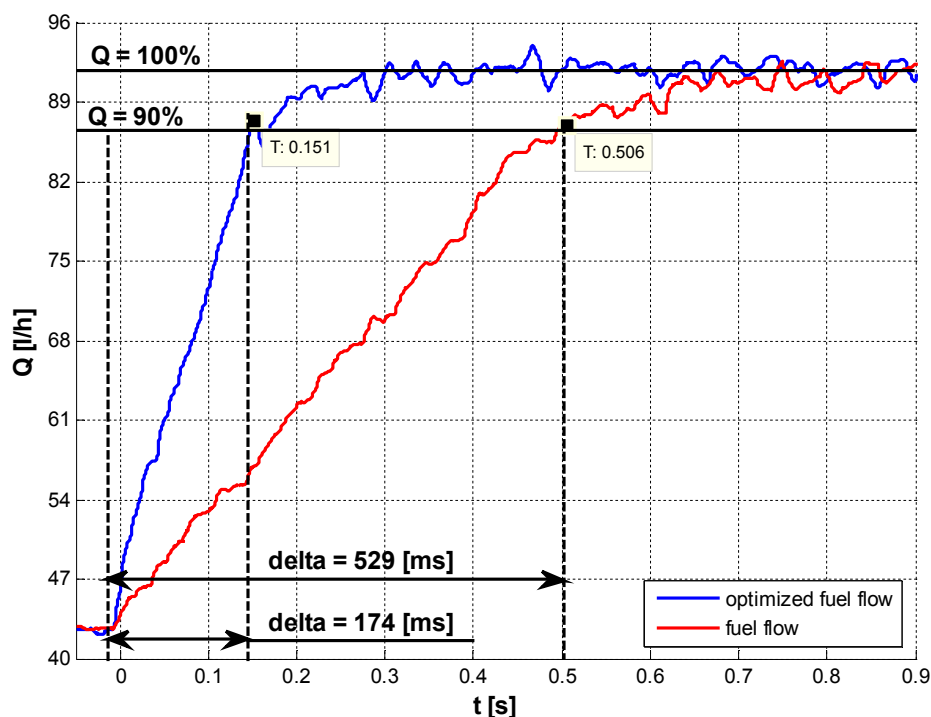


Obr. 38 Výsledky simulace optimalizovaných regulátorů.

5.4.2.6 Výsledky měření na reálném systému

Výsledky získané simulací byly implementovány do nastavení regulačních smyček reálného zařízení. Na měřicím standu s hydraulickým okruhem byly provedeny zkoušky dynamiky systému, simulující skokovou změnu průtoku paliva palivovým čerpadlem. Skoková změna byla z výchozího průtoku 43 l/h, což odpovídá otáčkám BLDC motoru 3250 min^{-1} . Nová požadovaná hodnota průtoku je 92 l/h (otáčky cca 7300 min^{-1}). Obr. 39 ukazuje porovnání nastavení optimalizovaného a neoptimalizovaného regulátoru.

Modrou barvou v grafu, Obr. 39, je znázorněn optimalizovaný průběh průtoku paliva čerpadlem. Červená barva znázorňuje neoptimalizovaný regulátor. Optimalizací bylo tedy dosaženo zrychlení dynamiky systému z 530 ms na cca 180 ms.



Obr. 39 Výsledky měření - skoková změna průtoku čerpadla.

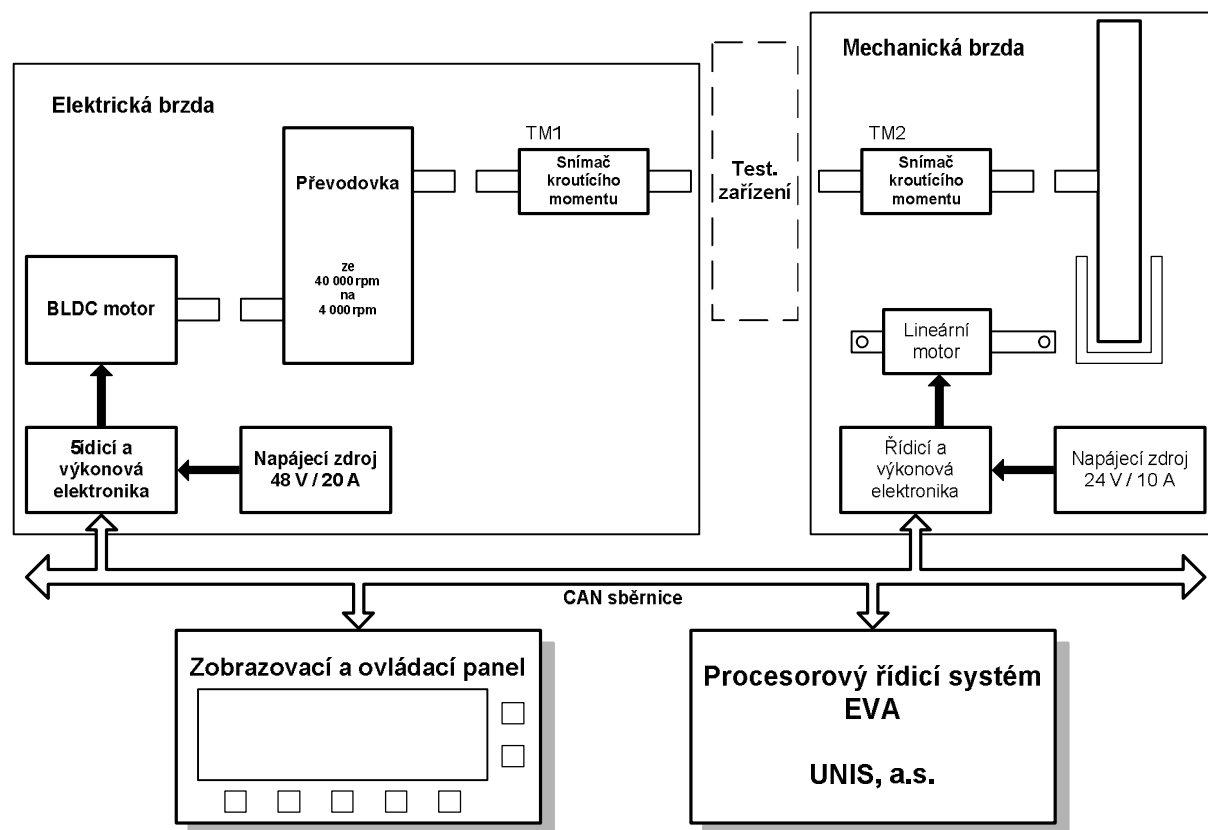
Mezi další důležité dynamické vlastnosti pohonné soustavy patří délka doby zastavení po přijetí signálu STOP. To úzce souvisí s nastavením regulačních smyček a vlastním řídicím algoritmem. Z důvodu přílišné setrvačnosti snímačů průtoku v hydraulickém okruhu, musí být tyto charakteristiky měřeny přímo na motoru jednotky z Hall snímačů.

5.5 Měřicí stůl

Měřicí systém, který byl realizován v rámci řešení disertační práce ve spolupráci se společností UNIS, a.s., slouží především k testování mechanických vlastností elektrických pohonů a jejich řídicích algoritmů. Celé laboratorní pracoviště pak slouží pro testování elektronicky komutovaných motorů v rozmezí výkonů do 1,5 kW při stejnosměrném napájení do 48 V. Získané údaje slouží také jako vstupní informace pro modelování a simulace v prostředí MATLAB/Simulink.

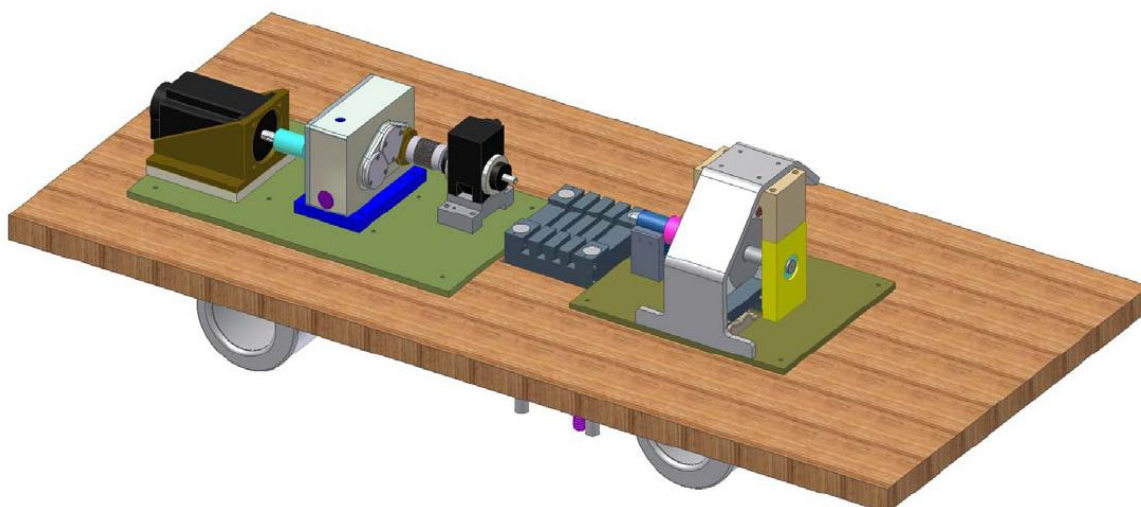
Na základě těchto požadavků byl vytvořen „měřicí stand“, jehož blokové schéma je uvedeno na Obr. 40 a grafický model pak na Obr. 41. Pro snazší orientaci lze přípravek rozdělit na více oddělených částí – mechanickou brzdu, elektrickou brzdu, řídicí procesorový systém a ovládací a zobrazovací panel.

Jednotlivé části jsou připojeny na společnou sběrnici typu CAN, která slouží pro řízení, sběr dat a zobrazení aktuálních fyzikálních veličin.



Obr. 40 Blokové schéma měřicího stolu.

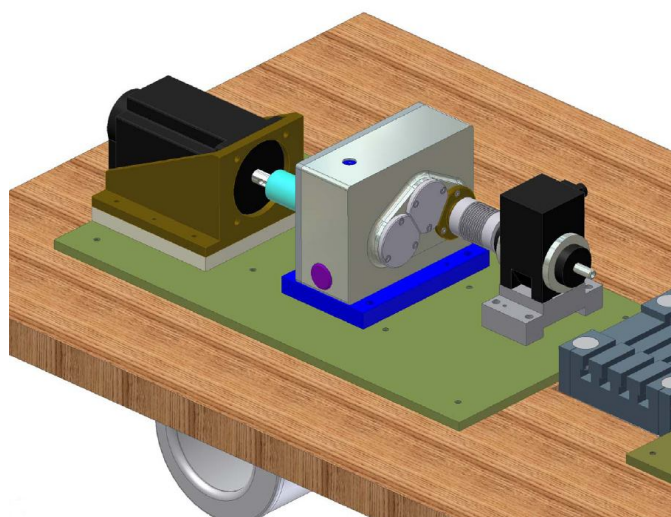
V následujících podkapitolách jsou blíže popsány jednotlivé části měřicího stolu, jejich parametry a možnosti.



Obr. 41 Grafický model měřicího stolu.

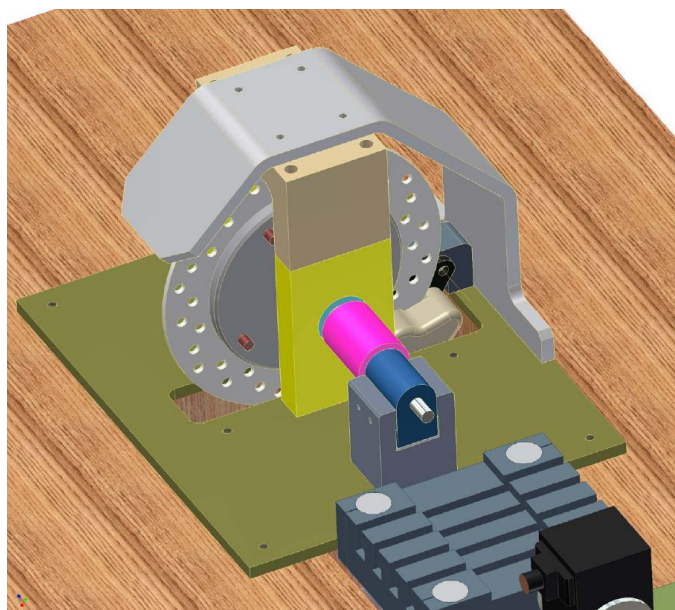
5.5.1 Elektrická brzda

Elektrická brzda, viz Obr. 42, je tvořena snímačem kroutícího momentu s maximálními parametry $40\,000\text{ min}^{-1}$ a $2\text{ N}\cdot\text{m}$ kroutícího momentu. Následuje dvoustupňová čelní převodovka se stejným převodovým poměrem na stupeň, tvořená koly se šikmými zuby. Z důvodu mazání a chlazení je uložena v olejové lázni. Převodový poměr je 1:10 a maximální přenositelný výkon kolem $1,5\text{ kW}$. Na výstupu z převodovky je osazen BLDC motor o výkonu 1 kW , který se chová jako elektrická brzda. Zátěžný moment zkoušeného motoru lze díky řídicí elektronice brzdy nastavit plynule v plném rozsahu. Informace o zátěžném momentu a rychlosti otáčení jsou k dispozici ze snímače v analogové formě, která je zpracována a převedena do digitální v procesorovém systému.



Obr. 42 Grafický model elektrické brzdy.

5.5.2 Mechanická brzda



Obr. 43 Grafický model mechanické brzdy.

Vstupní díl mechanické části měřicího stolu, viz Obr. 43, je opět tvořen nezávislým snímačem krouťicího momentu s maximálními parametry $10\,000\text{ min}^{-1}$ a $10\text{ N}\cdot\text{m}$ zátěžného momentu. Vlastní mechanická brzda je tvořena brzdovým diskem, který se používá v diskových brzdách dopravních prostředků. Z důvodu plynulé regulace brzdného účinku je brzdová čelist přitlačována na disk lineárním elektromotorem. Teplota brzdného disku je snímána bezkontaktním infračerveným teploměrem (pyrometrem). Rychlost otáčení brzdného disku je snímána indukčním snímačem, který reaguje na průchod upínacích šroubů disku. Analogové informace ze snímačů jsou převedeny na digitální a zpracovány procesorovou jednotkou.

Jednotlivé části jsou navzájem spojeny pružnými spojkami, které v případě potřeby umožňují redukovat průměry hřídelů jednotlivých dílů. Souosost zkoušeného motoru a snímače krouťicího momentu v mechanické i elektrické části je zajištěna výškově nastavitelným středovým hranolem, do kterého se upíná i zkoušený servomotor.

5.5.3 Ovládací a zobrazovací jednotka

Ovládací a zobrazovací jednotka je složena z grafického monochromatického LCD displeje a sadou ovládacích tlačítek. Je připojena na centrální sběrnici CAN, po které přijímá data jednotlivých fyzikálních veličin

k zobrazení a odesílá požadavky na ovládání. Mezi základní zobrazované parametry patří: kroutící moment ze snímačů momentu, rychlost otáčení brzdícího disku, teplota brzdného disku, proudy a napětí generované elektrickou brzdou. Mezi základní nastavitelné parametry patří: procento přitlačení brzdných čelistí, procento brzdného účinku elektrické brzdy a např. nastavení ochranných obvodů proti přetížení jednotlivých napájecích větví a snímačů.

Vzhledem k použití procesorového řídicího systému, lze získané výsledky prezentovat v digitální formě na počítači PC nebo rovnou na grafické jednotce integrované na měřícím stole. Pomocí výškově nastavitelného upínacího hranolu motoru, lze přizpůsobit k měření téměř libovolný servomotor příslušných rozměrů.

Během řešení disertační práce byly testovány elektronicky komutované motory renomovaných výrobců, jako je např. Maxon Motor, Anaheim Automation a Dundermotor.

Rovněž byly na této testovací lavici získány reálné odezvy z hydraulického palivového systému pro následnou analýzu v prostředí MATLAB, jak bylo popsáno v Kap. 5.4.

6 Přínosy disertační práce

Celková motivace vývoje a výzkumu v oblasti EC motorů je inspirována stále se zvyšujícím podílem tohoto typu pohonů v průmyslových, leteckých a automobilových aplikacích. Tyto typy motorů, které se rovněž uplatňují a budou uplatňovat i ve výrobních strojích, jejichž výzkumem, vývojem a ověřováním se školicí pracoviště dlouhodobě zabývá. Získané poznatky tak jsou důležitou oporou pro sledování současného technologického trendu ve světě. Vývojem a výrobou řídicích systémů pro elektricky komutované motory se zabývá, jak už bylo nastíněno v kapitole 3, mnoho světových firem a univerzitních pracovišť.

V komerčním sektoru se můžeme setkat většinou s produkty, které jsou přizpůsobeny na míru konkrétnímu mechanickému systému s konkrétním elektropohonem, vyráběným stejnou společností. Převážná část slouží k jednoduchému řízení, které pro svoji činnost vyžaduje motor osazený absolutním snímačem rotačního pohybu. Pro potřeby senzorového řízení v širokém rozmezí otáček a bezsenzorového řízení jsou tyto systémy téměř nepoužitelné.

Druhou stranu mince tvoří řešení různých univerzitních projektů. Většinou se jedná o velmi pokrokové a inovativní způsoby řízení, především různé modifikace vektorových metod a metod přímého řízení momentu. Pro svoji složitost se zcela vymykají omezeným možnostem komerčních elektronických modulů. Výpočtová náročnost aplikovaných matematických modelů použitých při řízení je značnou zátěží i pro velmi výkonný stolní počítač. Z tohoto důvodu jsou opět tato řešení nevhodná pro nasazení v letecké technice, především při prokazování jejich spolehlivosti a bezporuchovosti.

Hlavní teoretické přínosy disertační práce je možno shrnout do následujících bodů:

- vývoj, ověření a implementace vhodných metod senzorových a bezsenzorových řízení EC motorů v rozběhové fázi a při normálním provozu,
- vývoj, ověření a implementace vhodných moderních technologií a trendů v oblasti elektrických servopohonů pro kritické aplikace, spojené s řízením EC motorů,

- vypracování metodiky získání průběhu provozních charakteristik měřeného EC motoru jako důležité vstupní informace pro řízení v kritických aplikacích; tyto informace jsou velmi často nedostupné.

Přínosy disertační práce pro technickou praxi byly ověřeny ve spolupráci s externí společností UNIS, a.s., sekci Mechatronických systémů, spočívají v oblasti elektrických servopohonů a je možno je shrnout do následujících bodů:

- získání „*know-how*“ pro podporu dalšího výzkumu a vývoje metodou *Model Based Design*,
- získání „*know-how*“ v oblasti kritických aplikací a jeho ověření pro letectví na vývojových projektech externí firmy.

V oblasti pedagogické pak výsledky práce představují přínos využitelný ve všech stupních studia konstrukčních studijních oborů vysokých škol technického zaměření, především pak v možnostech implementace nových metod řízení pohyblivých částí výrobních strojů a robotických zařízení.

7 Závěr

Předložená disertační práce analyzuje současné technické trendy v oblasti elektrických servopohonů středních výkonů v kritických aplikacích leteckého průmyslu. Jsou diskutovány požadavky na kritické aplikace, jejich zařazení podle stupně závažnosti selhání a je krátce nastíněna problematika certifikování hotového výrobku před samotným nasazením do provozu na palubě letadla.

V úvodní části jsou popsána komerčně dostupná řešení řídicích jednotek elektronicky komutovaných motorů, která se však pro uvedené průmyslové odvětví nehodí z důvodu nedostatečných technických parametrů. Jsou dále blíže analyzovány moderní způsoby vektorového řízení a přímého řízení momentu. Tyto metody byly po ověření taktéž shledány jako neuspokojivé, především z důvodu výpočetní náročnosti na soudobé řídicí mikroprocesory.

Byl proto navržen a experimentálně ověřen způsob řízení, který je kombinací několika reálně použitelných metod. Pro potřeby dynamického řízení EC motoru se jeví jako nezbytné motor osadit snímači, alespoň nejjednodušší formou, tzn. třemi Hallovyými snímači rozmístěnými po 60°. Je tím zásadně zvýšena spolehlivost řízení rozběhu motoru i řízení otáček v širokém rozsahu provozních mezí. Jako způsob řízení motorů ve velmi nízkých otáčkách se jeví nejlepší aplikovat metody sinusového řízení, tj. buzení všech tří fází EC motoru současně. Rotor motoru poté dosahuje hladké momentové charakteristiky a připojená zátěž nevykazuje trhavý pohyb. Po akceleraci na vyšší otáčky přechází řízení v klasické, tj. jsou současně napájena pouze 2 vinutí.

Byla navržena struktura regulačních obvodů, která se většinou skládá z nadřazené rychlostní a podřízené proudové smyčky. Tyto regulátory byly aplikovány jako diskrétní v signálovém procesoru.

Značnou část disertační práce tvoří aplikování metody „*Model Based Design*“ při vývoji a optimalizaci řídicího algoritmu pohonu. Byl vytvořen model elektronicky komutovaného motoru, na kterém lze poměrně snadno odladit fázi rozběhu motoru. Porovnáním výsledků simulací s výsledkem reálného motoru z měřicího stolu lze konstatovat, že při dodržení správných vstupních hodnot z katalogových listů výrobce se měřené a simulované průběhy a chování téměř shodují. Značně omezující vlastností tohoto modelu je poměrně velká

časová a výpočetní náročnost simulace. Pro simulování několika vteřin chování motoru po zapnutí je výpočtový čas v řádu několika minut. Model lze zjednodušit za cenu snížení výsledné přesnosti v porovnání s reálným chováním.

Za velmi efektivní metodu vývoje na bázi modelování lze považovat optimalizační fázi při ladění regulačních obvodů. Bývá častou technickou praxí, že detailní matematicko-fyzikální popis řízeného systému není možné analyticky vytvořit, především z důvodu jeho složitosti. Nabízí se tedy možnost experimentálního testování takového systému. Na příkladu bylo ukázáno, že metodami modelování lze dosáhnout přiblížení k požadovaným přechodovým charakteristikám za cenu výrazného zkrácení času oproti metodám zkoušení „na slepo“. Lze tak i předejít nebezpečným provozním stavům v případě rozsáhlejších a větších systémů. Po aplikaci získaných parametrů a konstant ze simulací jsme obdrželi výsledky, které se téměř shodují s chováním reálného systému.

Nevýhodou simulačního modelování je i přes stále se zdokonalující výpočetní techniku stále vysoká náročnost na výpočetní výkon počítače. I přes maximální zjednodušení modelovaných systémů nelze na soudobém hardware reálně simulovat některé výpočtově náročné algoritmy řízení, mezi něž např. patří bezsenzorové vektorové metody. V tomto případě je nutné k problému přistupovat odlišně a modelovat pouze některé části systému odděleně. Poměrně vysoká cena simulačních vývojových prostředků (MATLAB, dSPACE, atd.) patří rovněž mezi nepřehlédnutelné nevýhody.

Při dodržování určitých zásad při tvorbě simulačních modelů, schématických diagramů, řídicích algoritmů, atd. lze však s výhodou používat moderní softwarové vybavení pro automatické generování vývojové dokumentace. Lze tedy konstatovat, že metoda „*Model Based Design*“ je efektivním postupem pro zkrácení životního vývojového cyklu elektrických servopohonů v kritických oblastech. Její masové použití však v nejbližších letech nelze očekávat, obzvláště v leteckém průmyslu, kde jsou veškeré inovace a moderní přístupy aplikovány se značným časovým zpožděním.

Seznam použité literatury

- [1] BRANDEJSKÝ, T. *Vývoj softwaru pro bezpečnostně kritické aplikace z pohledu kybernetiky*. Časopis Automatizace, ročník 51, číslo 4, duben 2008.
- [2] ŠVÉDA, M., HUBÍK, V. *Elektrické servopohony pro kritické aplikace v letectví*. Časopis Automa, číslo 7, Praha 2008.
- [3] RTCA/DO-178B: *Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification*. RTCA, Inc.: USA, 1992.
- [4] RTCA/DO-254: *Design Assurance Guidance for Airborne Electronic Hardware*. RTCA, Inc.: USA, April 2000.
- [5] RTCA/DO-160D: *Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment*. RTCA, Inc.: USA, July 21, 1998. (Latest revision RTCA/DO-160F)
- [6] ŠVÉDA, M., OPLUŠTIL, V, HUBÍK, V. *Design and development of COTS based engine control system for aerospace applications*. Nepublikovaný článek, 2008.
- [7] SINGULE, V., BŘEZINA, T. *Návrh mechatronické soustavy*. Kapitola v knize *Mechatronika*, str. 193-231, Computer Press, Brno, 2006.
- [8] PAVELKA, J. *Elektrické pohony*. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Praha, leden 2007.
- [9] SKALICKÝ, J. *Elektrické servopohony*. VUT Brno, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Brno, 1999.
- [10] SINGULE, V. *Motory s elektronickou komutací (EC motory) pro mechatronické aplikace*. Časopis Technika a trh, číslo 9, Praha 2007.
- [11] BROŽ, V., SINGULE, V. *Motory Maxon – motory vhodné pro vysoké teploty*. Časopis Technika, číslo 3, vydavatel Techpark, Žilina 2009.
- [12] MORETON, P. *Industrial Brushless Servomotors*. Reed Educational and Professional Publishing Ltd, 2000. ISBN 0-7506-3931-8.

- [13] ZAMBADA, J. *Sensorless Field Oriented Control of PMSM Motors*. Microchip Technology Inc., Application Note AN1078, 2007.
- [14] *Brushless DC Motor Field Oriented Control*. Embedded Studio, web page, <http://embeddedstudio.com>, září 2009.
- [15] OZTURK, S.B., TOLIYAT, H.A. *Direct Torque Control of Brushless DC Motor with Non-Sinusoidal Back-EMF*. Paper in Electric Machines & Drives Conference, IEMDC '07, IEE International.
- [16] *Maxon Motor*. Výrobce elektrických pohonů, web page, <http://www.maxonmotor.com>, září 2010.
- [17] *Anaheim Automation*. Výrobce elektrických pohonů, řízení a motorových doplňků, web page, <http://www.anaheimautomation.com>, leden 2010.
- [18] *Allegro MicroSystems, Inc.* Výrobce polovodičových čipů pro elektrické pohony, web page, <http://www.allegromicro.com>, březen 2009.
- [19] *Microchip*. Výrobce mikroprocesorů a DSC pro motorové aplikace, web page, <http://www.microchip.com>, září 2010.
- [20] PROKOP, L., CHALUPA, L. *3-Phase BLDC Motor Control with Sensorless Back EMF Zero Crossing Detection Using 56F80x*. Application Note, AN1914, Freescale Semiconductor, 2005.
- [21] BROWN, W. *Brushless DC Motor Control Made Easy*. Application Note, AN857, Microchip Technology Inc., 2002.
- [22] ELLIOT, CH., BOWLING, S. *Using the dsPIC30F for Sensorless BLDC Control*. Smart Power Solutions, LLP, Microchip Technology Inc., 2004.
- [23] HOLUB, R., VINTR, Z. *Spolehlivost letadlové techniky*. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno 2001.
- [24] ZAMBADA, J. *Sinusoidal Control of PMSM Motors with dsPIC30F DSC*. Application Note, AN1017, Microchip Technology Inc., 2005.

Seznam zkratk

AC	střídavý proud
Back-EMF	zpětná elektromotorická síla
BLDC	elektronicky komutovaný motor
CAN	sériová komunikační sběrnice
COTS	<i>Commercial-Off-The-Shelf</i>
CW	po směru hodinových ručiček, směr záporný
CCW	proti směru hodinových ručiček, směr kladný
DC	stejnoseměrný proud
DSP	digitální signálový procesor
EC	elektronicky komutovaný
ECU	elektronická řídicí jednotka motoru
EHA	elektro-hydraulický aktuátor
EMA	elektro-mechanický aktuátor
FMEA	spolehlivostní analýza
FMECA	spolehlivostní a důsledková analýza
FRAM	feromagnetická paměť
FTA	strom poruch
HIL	<i>Hardware-In-the-Loop</i>
HW	hardware
IGBT	bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
M	motor
MBD	<i>Model-Based-Design</i>
MCU	mikroprocesor
MIPS	milion instrukcí za sekundu
MOSFET	unipolární tranzistor
PWM	pulzně šířková modulace
RBD	blokové diagramy bezporuchovosti
RCP	<i>Rapid-Control-Prototyping</i>
RS-232	sériová komunikační sběrnice
RS-485	sériová komunikační sběrnice

Seznam příloh

Přílohy.....	91
A. Schéma funkčního vzorku	91
B. Schéma Prototypu I.....	92
C. Schéma Prototypu II.....	94

B. Schéma Prototypu I.

